

博士論文

感覚間相互作用を用いた 視触覚刺激提示手法に関する研究

(A Study on Visual-Tactile Display Using Cross-Modal Interaction)

平成 28 年 12 月 1 日 提出

指導教員 小川 剛史 准教授

東京大学大学院工学系研究科

電気系工学専攻

37-147063 新島 有信

要旨

本研究は、感覚間相互作用を用いた視触覚刺激提示手法に関する研究である。バーチャルリアリティにおいて、触覚フィードバックはバーチャル物体とのインタラクションのために重要な要素である。本研究では特に振動刺激の知覚位置に着目し、視覚刺激によって触覚位置を制御する手法を提案する。

第1章では、バーチャルリアリティの分野における触覚ディスプレイの現状と課題を紹介する。触覚の受容器は全身にあるため、触覚ディスプレイによる触覚提示範囲は広いことが望ましい。本研究は、触覚ディスプレイの触覚提示範囲の拡大を目的として取り組む。対象は広く普及している振動モータを利用した触覚ディスプレイとする。触覚提示範囲拡大に向けたアプローチとして、視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示した場合、触覚位置は視覚提示位置方向に転移すると仮定し、視覚刺激と触覚刺激の提示位置の距離が一定以内となるように視覚刺激を制御することで触覚位置を制御する手法を提案する。提案手法の実現性を検証するために、視触覚刺激提示環境下において、単数の視覚刺激が触覚位置に与える影響と複数の視覚刺激が触覚位置に与える影響について調査する。

第2章では、本研究に関連がある研究を紹介する。触覚の生理学的知見、触錯覚、ファントムセンセーション、視覚と触覚のクロスモダリティ、振動モータを用いた触覚ディスプレイに関する研究をまとめるとともに、本研究の位置づけを明らかにする。

第3章では、単数の視覚刺激提示が触覚位置に与える影響について検証した以下の実験について述べる。(1) 振動モータにより直接触覚提示した場合とファントムセンセーションを利用して触覚提示した場合における触覚位置。(2) 2個の振動モータの線分上で、触覚刺激のみを提示した場合と視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示した場合における触覚位置。(3) 2個の振動モータの線分上で、視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示した場合における触覚位置。(4) 2個の振動モータの線分上で、バーチャル物体の動きの軌跡を提示した場合の触覚位置。(5) 二次元平面上において、視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示した場合の触覚位置。最後に実験結果を解析して得られた結論について述べる。

第4章では、複数の視覚刺激提示が触覚位置に与える影響について検証した以下の実験について述べる。(1) 複数の視覚刺激がファントムセンセーションの生起に与える影響。(2) 複数の視覚刺激提示が触覚位置の定位に与える影響。最後に実験結果を解析して得られた結論について述べる。

第5章では、第3章と第4章の実験結果を基に、視覚刺激と触覚刺激の提示位置の距離を考慮して、以下の触覚ディスプレイを実装する。(1) 前腕に振動モータを設置した触覚ディスプレイ。(2) 手のひらに振動モータを設置した触覚ディスプレイ。(3) 小型の筐体に振動モータを設置した触覚ディスプレイ。さらに、実装した触覚ディスプレイをデモ展示することで得た体験者のコメントをもとに、本研究の提案手法の実現性について議論する。

第6章では、視覚刺激が触覚位置に与える影響に関する検証実験およびその知見を基に提案した視触覚刺激提示手法についてまとめる。最後に今後の展望について述べる。

Abstract

In this thesis, I present a study on visual-tactile display using cross-modal interaction. In virtual reality, haptic feedback is an important factor for interaction with virtual objects. I focus on localization of vibrotactile perception and propose a method to control vibrotactile localization by visual stimulation in this thesis.

In the first chapter, I introduce the background and problems of tactile display in the field of virtual reality. Tactile display should be able to present haptic feedback in a large area because tactile receptors are in the full body. In this thesis, I have tackled this to be larger area presented by tactile display. The target is a visual-tactile display using vibration motors. I suppose that the position of vibrotactile perception will be shifted to that of visual stimulation if visual stimulation and tactile stimulation are presented at different positions. I propose a method to control tactile localization with visual stimulation by keeping the distance of the position of visual stimulation and that of tactile stimulation shorter than a threshold. To verify the feasibility of the proposed method, I investigate the influence of a single visual stimulus and multiple visual stimuli on the vibrotactile localization.

In the second chapter, I introduce related works. Studies on tactile physiological findings, tactile illusion, phantom sensation, cross-modality of visual and tactile sensation, tactile display using vibration motors, are summarized to clarify the position of my study.

In the third chapter, I describe the following experiments to investigate the influence of a single stimulus on the localization of vibrotactile perception. (1) Vibrotactile localization by a single vibration motor or phantom sensation. (2) Vibrotactile localization when only tactile stimulation is presented or visual stimulation and tactile stimulation are presented at the same position on a line segment of two vibration motors. (3) Vibrotactile localization when visual stimulation and tactile stimulation are presented at different positions on a line segment of two motors. (4) Vibrotactile localization when a locus of movement of the virtual object is presented on a line segment of two motors. (5) Vibrotactile localization when visual stimulation and tactile stimulation are presented at different positions in a 2D plane. Finally, the conclusion obtained by analyzing the experimental results is described.

In the fourth chapter, I describe the following experiments to investigate the influence of multiple visual stimuli on the localization of vibrotactile perception. (1) The influence of multiple visual stimuli on the occurrence of phantom sensation. (2) The influence of multiple visual stimuli on the localization of vibrotactile perception. Finally, the conclusion obtained by analyzing the experimental results is described.

In the fifth chapter, based on the experimental results in the third chapter and the fourth chapter, the following tactile display is implemented in consideration of the distance of the position of visual stimulation and that of tactile stimulation. (1) A tactile display on a forearm. (2) A tactile display on a palm. (3) A tactile display on a handheld device. In addition, I discuss the feasibility of the proposed method based on the feedback comments obtained from the demonstration of the tactile display.

In the sixth chapter, I summarize the experiments to investigate the influence of visual stimulation on vibrotactile localization and the proposed method of visual-tactile display. In the last part of my thesis, I describe future vision.

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 仮説と提案手法	4
1.4 貢献	5
1.5 本論文の構成	5
第2章 関連研究	7
2.1 触覚の生理学的知見	7
2.2 触錯覚	8
2.3 ファントムセンセーション	9
2.4 視覚と触覚のクロスモダリティ	10
2.5 振動モータを用いた触覚ディスプレイ	12
第3章 単数の視覚刺激提示が触知覚位置に与える影響	15
3.1 はじめに	15
3.2 仮説	15
3.3 実験環境	16
3.4 実験1：ファントムセンセーション提示時の触知覚位置の検証	17
3.5 実験2：視触覚刺激を同位置に提示した場合の触知覚位置の検証	20
3.6 実験3：視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示した場合の触知覚位置の検証	22
3.7 実験4：バーチャル物体の動きの違いが触知覚に与える影響の検証	26
3.8 実験5：二次元平面上において視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示した場合の触知覚位置の検証	28
3.9 まとめ	30

第4章 複数の視覚刺激提示が触知覚位置に与える影響	31
4.1 はじめに	31
4.2 実験装置	31
4.3 複数の視覚刺激がファントムセンセーションの生起に与える影響に関する検証実験	32
4.4 複数の視覚刺激提示が触知覚位置の定位に与える影響に関する検証実験	45
第5章 実装	58
5.1 触覚ディスプレイの設計例	58
5.2 前腕に振動モータを設置した触覚ディスプレイ	58
5.3 手のひらに振動モータを設置した触覚ディスプレイ	59
5.4 小型の筐体に振動モータを設置した触覚ディスプレイ	60
5.5 考察	60
第6章 結論	66
6.1 結論	66
6.2 今後の展望	68
謝辞	70
発表文献	71

目 次

1.1	AR アプリケーション	3
1.2	視触覚刺激提示条件	5
2.1	ファントムセンセーション	9
3.1	実験装置を装着した様子	16
3.2	実験システム構成	17
3.3	振動モータの配置図	18
3.4	実振動刺激提示時とファントムセンセーション (PS) 提示時における触覚提示位置と触知覚位置の距離	19
3.5	5箇所触覚提示位置	20
3.6	触覚刺激のみを提示した場合と視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示した場合の触覚提示位置と触知覚位置の距離	21
3.7	移動方向の定義	23
3.8	移動方向が同じ場合の各刺激提示位置と触知覚位置の距離	23
3.9	移動方向が異なる場合の各刺激提示位置と触知覚位置の距離	24
3.10	視覚提示位置と触知覚位置の距離	27
3.11	触覚刺激のみ提示した場合	28
3.12	視触覚刺激を同位置に提示した場合	28
3.13	視覚刺激が“1”の位置の場合	29
3.14	視覚刺激が“9”の位置の場合	29
4.1	LED と振動モータを用いた視触覚ディスプレイ	32
4.2	視触覚ディスプレイの装着図	32
4.3	ディスプレイの配置図	33
4.4	ファントムセンセーションの生起を促進する刺激提示例	34

4.5	ファントムセンセーションの生起を抑止する刺激提示例	34
4.6	被験者への回答指示用紙	34
4.7	刺激パターン (1回目)	35
4.8	刺激パターン (2回目)	36
4.9	刺激パターン (3回目)	37
4.10	1回目の回答結果	38
4.11	2回目の回答結果	39
4.12	3回目の回答結果	40
4.13	ファントムセンセーションの生起確率	41
4.14	ファントムセンセーションの生起確率と False Alarm Rate	44
4.15	刺激提示パターン例	48
4.16	触知覚定位割合 (触覚刺激: 1列目, 視覚刺激点数: 1個)	50
4.17	触知覚定位割合 (触覚刺激: 1列目, 視覚刺激点数: 2個)	50
4.18	触知覚定位割合 (触覚刺激: 3列目, 視覚刺激点数: 1個)	51
4.19	触知覚定位割合 (触覚刺激: 3列目, 視覚刺激点数: 2個)	51
4.20	触知覚定位割合 (触覚刺激: 1&3列目, 視覚刺激点数: 1個)	52
4.21	触知覚定位割合 (触覚刺激: 1&3列目, 視覚刺激点数: 2個)	52
4.22	視覚刺激 2列目点灯時の触知覚定位割合	53
4.23	視覚刺激 1&3列目点灯時の触知覚定位割合	53
4.24	触知覚点数割合 (触覚刺激: 1列目)	54
4.25	触知覚点数割合 (触覚刺激: 3列目)	55
4.26	触知覚点数割合 (触覚刺激: 1&3列目)	56
5.1	振動モータの設置位置の例	63
5.2	テーブルトップ型視触覚ディスプレイの例	64
5.3	身体上を AR キャラクタが動く様子	64
5.4	手のひら用触覚ディスプレイ	65
5.5	筐体設置型触覚ディスプレイ	65

表 目 次

3.1	触覚提示位置と印加電圧	19
3.2	移動方向が同じ場合の多重比較結果	24
3.3	移動方向が異なる場合の多重比較結果	25
4.1	視覚と触覚の刺激パターン（表中の数字は刺激パターン ID）	47
4.2	刺激点数変化時の視覚刺激パターン（触覚刺激は 1 & 3 列目）	47
4.3	残差分析結果 1	50
4.4	残差分析結果 2	51
4.5	残差分析結果 3	52
4.6	残差分析結果 4	53

第1章 序論

1.1 研究背景

バーチャルリアリティとは、「みかけや形は原物そのものではないが、本質的あるいは効果としては現実であり原物であること」と定義される [1]。すなわち、ヒトがそれぞれの物事に対して本質であると考えられる部分を抽出し、それを伝達可能な知覚刺激を提示することによって、感覚器を通して知覚する人工的な現実感を現実と同じだと思わせることである。コンピュータが生成する人工環境をバーチャルリアリティたらしめるには、以下の三要素が必要である。

1. 3次元空間
2. 実時間相互作用
3. 自己投射

つまり、バーチャルリアリティとは、ヒトにとって自然な3次元空間であり、その空間内の環境や物体と実時間でインタラクションを行うことができ、自分がその空間内に入り込んでいると思える没入感が必要である。

これまで、視覚や聴覚のディスプレイ（刺激を提示する装置）は目覚ましい発展を遂げており、高解像度のディスプレイや安価でも没入感の高いディスプレイが開発されてきたが、触覚、嗅覚、味覚のディスプレイは発展途上であり、質が十分ではない。しかし、バーチャルリアリティにおける実時間相互作用や自己投射を実現するためには、視聴覚だけでは不十分であり、触覚を始めとする他の感覚のディスプレイの開発が望まれている。そこで、本論文では、視聴覚ディスプレイの次に普及が見込まれている触覚ディスプレイに着目する。

広義の触覚は、皮膚感覚と深部感覚からなる体性感覚を意味する。触覚は非常に複雑であり、そのメカニズムも十分に解明されていないことから、バーチャルリアリティにおいて現状の技術で現実の触覚を忠実に再現することは不可能である。したがって、触覚ディスプレイの設計においては、全ての触覚を忠実に再現するのではなく、力覚や手触り、温

度感覚など提示すべき触覚フィードバックの対象を絞って、それに適したアクチュエータを用いることが多い。単一のアクチュエータのみで提示する触覚フィードバックは、その提示範囲や多様性が限定されるため、前腕などの広範囲に触覚を提示する場合や、触覚提示位置や個数を変化させて情報を伝えるような複雑な触覚表現を想定する場合には、多数のアクチュエータを設置する必要がある。しかし、アクチュエータ数を増やした場合、装置が大掛かりになったり、アクチュエータの制御が複雑になったりするという課題がある。そこで本論文では、少数のアクチュエータで構成されたシンプルな触覚ディスプレイでも複雑な触覚表現を可能とする手法を提案する。

触覚刺激は、バーチャル物体とのインタラクションの体験を向上させるために有用である [2]。例えば、モータや電極等の小型のアクチュエータをウェアラブルデバイスに内蔵して触覚フィードバックを提示することで、バーチャル物体の質量や、バーチャルキャラクターと触れている感覚を表現する手法が提案されている [3, 4, 5, 6]。さらに全身スーツに多数の振動モータを内蔵させ、全身に振動刺激を提示することでバーチャルリアリティへの没入感を高める触覚ディスプレイも開発されている [7]。従来の代表的な触覚提示手法は、振動刺激 [8]、電気刺激 [9]、超音波刺激 [10] などを用いて皮膚感覚を刺激する。一方、力覚を提示するための手法としては、アームやワイヤを用いて反力を提示する方法 [11, 12] や、電氣的筋肉刺激を用いて提示する手法 [13, 14, 15] が挙げられる。振動モータを用いた触覚フィードバックは、アクチュエータが小型で安価で安全で使いやすいことから、スマートフォンを始めとする携帯端末やウェアラブルデバイスに広く用いられている [16, 17]。振動モータを利用した触覚ディスプレイでは、複数の振動モータを格子状に配置して、振動させるモータの位置や順番を変化させることで、位置や方向に関する触覚フィードバックや文字の描画を行うことができる [18, 19, 20, 21, 22]。本論文では、広く普及しており用途も多彩であることから、振動モータを用いた触覚ディスプレイに着目した。初期検討として、振動モータを設置する部位は前腕とする。

1.2 研究目的

前節で述べたことをまとめると、本研究の対象および目的は以下のとおりである。

- 対象：触覚ディスプレイ
- アクチュエータ：振動モータ
- 部位：前腕



図 1.1 AR アプリケーション

- 研究目的：少数のアクチュエータで複雑な触覚表現を可能とする

これらの条件を満たすアプリケーション例として、図 1.1 に示すような拡張現実感 (Augmented Reality) 技術 [23] を利用したバーチャルキャラクターとのインタラクションが考えられる。視覚刺激としてのバーチャルキャラクターが提示されている状態で、振動モータを用いて触覚刺激を提示し、視覚刺激と触覚刺激を同期させることで、バーチャルキャラクターがユーザの身体の上を歩き回る感覚を提示するアプリケーションである。このようなアプリケーションを想定した場合、バーチャルキャラクターの位置や個数に応じて振動刺激パターンを変化させるような複雑な触覚表現が必要となり、少数のアクチュエータのみで実現することは困難であった。

少数のアクチュエータを用いた触覚ディスプレイにおいて触覚表現を拡張する手法として、触錯覚を利用する方法とクロスモダリティを利用する方法が挙げられる。例えば、振

動刺激を利用した触覚ディスプレイにおいては、振動子が設置されている位置とは異なる位置に触覚を定位させる手法として仮現運動（振動子が移動しているように感じる錯覚現象）やファントムセンセーション（2個の振動子を同時に振動させると間の1点が振動しているように感じる錯覚現象）などの触錯覚を利用した触覚ディスプレイが提案されており、それらの触錯覚を含む触覚刺激の提示パターンと触覚位置の定位の関係については多数報告されている [8, 24]. ファントムセンセーションを利用することで振動モータ間の触覚提示が可能となるが、二次元平面上の触覚提示を行う場合には格子状に多数の振動モータを配置しなければならないといった問題が生じる [8].

クロスモダリティとは、複数の感覚を統合して一つの感覚を形成することである。視覚刺激と触覚刺激を同時に提示した場合におけるユーザの触覚は、視覚刺激と触覚刺激の双方の影響を受け、クロスモダリティが生起されることが予想される。視覚と触覚のクロスモダリティ [2, 25, 26] や聴覚と触覚のクロスモダリティ [27, 28, 29, 30] に関する研究成果は多数存在し、クロスモダリティにより触覚の知覚が変化すると報告されている。クロスモダリティをARにおける触覚に応用した例として、物体の硬さ [31] や痛覚知覚 [32] を視覚刺激によって変化させる手法が提案されている。また、クロスモダリティの生起には視覚刺激の情報と触覚刺激の情報の整合性が保たれることが条件となり、視覚刺激の情報と触覚刺激の情報が乖離する場合にはクロスモダリティが発生しにくいことが報告されている。

このように触錯覚やクロスモダリティを利用して触覚表現を拡張する研究は多数行われているが、触覚の空間的知覚の拡張の検証は限定的なものにとどまっている [33, 34]. 本研究では、少数のアクチュエータによる触覚刺激提示時のユーザの触覚の空間的知覚をさらに拡張し、触覚位置や個数や錯覚生起の制御を可能とすることを旨とする。

1.3 仮説と提案手法

本論文では、ヒトの空間的位置の知覚は視覚が支配的であることに着目し、触覚刺激と同時に視覚刺激を提示し、視覚と触覚のクロスモダリティを利用することで触覚の空間的知覚を拡張する手法を提案する。クロスモダリティが生起される条件下では、触覚刺激を変化させなくても視覚刺激を変化させることで、視覚刺激に誘導されて触覚知覚が変化すると仮定した。すなわち、視覚刺激の提示パターンを変化させることで、触覚位置を転移させたり、触覚点の個数を変化させたり、ファントムセンセーションの生起を制御したりすることができる考えた。

刺激提示個数		触覚刺激	
		単数	複数
視覚刺激	単数	3章	3章
	複数	4章	4章

図 1.2 視触覚刺激提示条件

触知覚が視覚に誘導される条件として、従来のクロスモダリティの研究と同様に、空間的整合性が保たれることが重要であると考えられる。空間的位置の知覚においては、視覚刺激と触覚刺激の提示位置の距離が重要であると考え、この距離がある閾値以下の範囲内では、視覚刺激に誘導されて触知覚が変化すると仮定した。そこで本論文では、視覚刺激と触覚刺激の提示条件を図 1.2 のように分類して、各条件における視触覚刺激提示環境下での触知覚を検証し、提案手法の実現性について述べる。

1.4 貢献

本論文は、少数のアクチュエータで構成された触覚ディスプレイによる触覚フィードバック提示時のユーザの触知覚パターンの拡張を目的とし、視覚刺激と触覚刺激のクロスモダリティを利用することで、触知覚位置の転移、触知覚点数の増減、触錯覚生起の制御を可能とする手法について提案する。視覚刺激により触知覚を誘導するための条件として、視覚刺激の提示位置と触覚刺激の提示位置の距離に着目し、様々な視触覚刺激提示条件下における触知覚について検証実験を行った。従来研究では、触知覚の位置だけでなく個数や錯覚まで含めて視覚刺激で制御した例はなく、視触覚刺激環境下における触覚表現拡張のための視覚刺激の有用性について示したことが貢献である。

1.5 本論文の構成

本論文では、本章を含む全6章から構成される。第2章では、本研究に関連する知見や研究として、触覚の生理学的知見、触錯覚に関する研究、ファントムセンセーションに関する研究、視覚と触覚のクロスモダリティに関する研究、振動モータを用いた触覚ディスプレイに関する研究について説明する。第3章では、AR技術によるバーチャルボールと

振動モータを用いた視触覚刺激提示環境下において、単数の視覚刺激を提示した場合の触覚位置に関する以下の項目を検証した実験について述べる。

1. 振動モータにより直接触覚提示した場合とファントムセンセーションを利用して触覚提示した場合における触覚位置。
2. 2個の振動モータの線分上で、触覚刺激のみを提示した場合と視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示した場合における触覚位置。
3. 2個の振動モータの線分上で、視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示した場合における触覚位置。
4. 2個の振動モータの線分上で、バーチャル物体の動きの軌跡を提示した場合の触覚位置。
5. 二次元平面上において、視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示した場合の触覚位置。

第4章では、LEDと振動モータを用いた視触覚刺激提示環境下において、複数の視覚刺激を提示した場合の触覚位置やファントムセンセーションの生起確率について述べる。第5章では、第3章と第4章の実験結果から得られた知見をもとに、以下の触覚ディスプレイに関する振動モータの設置位置やアプリケーション例を示す。

1. 前腕に振動モータを設置した触覚ディスプレイ
2. 手のひらに振動モータを設置した触覚ディスプレイ
3. 小型の筐体に振動モータを設置した触覚ディスプレイ

第6章では、本研究の結論について述べる。そして、本論文の研究成果をもとにした今後の展望について論じる。

第2章 関連研究

本章では、本論文の提案手法と関連がある研究として、ヒトの触覚に関する生理学的知見、触錯覚に関する研究、ファントムセンセーションに関する研究、視覚と触覚のクロスモダリティに関する研究、振動モータを利用した触覚ディスプレイに関する研究について説明する。

2.1 触覚の生理学的知見

ヒトは環境の情報を様々な感覚器官を通して受容しているが、視覚、聴覚、味覚、嗅覚、平衡感覚以外の、分化した感覚器官を持たない感覚を体性感覚という [35]。体性感覚は、触覚、圧覚、温度感覚、痛覚を感じる皮膚感覚と、位置覚、運動覚、抵抗覚、重量覚を感じる深部感覚（固有感覚）に分けられる。本稿では、皮膚感覚の触覚を中心に述べる。

ヒトの皮膚は、表皮、真皮、皮下組織の3層からなる [36]。触覚に関与する受容器は特殊構造を持つ機械受容器であり、マイスナー小体、パチニ小体、メルケル触盤、ルフィニ終末の4種類がある。これらの受容器に連なる神経繊維の直径は、6 - 12 μm であり、伝導速度は 35 - 70 m/s である。

機械受容器と神経繊維を合わせてひとつの単位と考え、機械受容単位と呼ぶ。機械受容単位は、受容野の形態と刺激に対する応答特性から以下の4種類に分類される [37]。

- 速順応 I 型単位 (fast adapting type I unit, FA I)
- 速順応 II 型単位 (fast adapting type II unit, FA II)
- 遅順応 I 型単位 (slowly adapting type I unit, SA I)
- 遅順応 II 型単位 (slowly adapting type II unit, SA II)

受容野の形態は大きく2種類に分けられ、FA I と SA I は受容野が小さく受容野の境界がはっきりしているが、FA II と SA II は受容野が大きく受容野境界が不鮮明であるという特徴がある。応答特性も大きく2種類に分けられ、FA I と FA II は変化のみに応答し、SA

IとSA IIは変位にも応答する。各受容単位に対応する機械受容器は、FA Iがマイスナー小体、FA IIがパチニ小体、SA Iがメルケル触盤、SA IIがルフィニ終末であるとされている。また、FA IとSA Iは皮膚部位により分布密度が異なり、一方、FA IIとSA IIは皮膚部位による密度差が少なく分布密度が低い。

振動刺激を用いてヒトの触覚特性を調べた研究では、応答する機械受容器が振動刺激の周波数によって異なることが示された [38]。2 Hz 以下ではSA I、2 - 40 HzではFA I、40 Hz以上ではFA IIが応答し、200 - 300 Hzで最も振動の検出閾値が小さくなる。また、FA IIのみが空間的加重特性を持ち、振動刺激の提示面積が広がると振動検出閾値が低くなる。

触覚の分解能は触2点閾の測定により調べられてきた [39]。皮膚部位によって分解能は大きく異なり、指先、唇、舌で小さく (2 - 3 mm 程度)、上腕、胴、大腿で大きい (15 - 30 mm)。触2点閾の大小は、脳における触覚情報処理面積と関係しており、面積が大きいほど触2点閾は小さくなる。また、加齢とともに触2点閾は広がると言われている [40]。

本研究では振動刺激を用いるため、対応する機械受容器はパチニ小体となる (振動周波数 200 - 300 Hz で発火しやすい)。また、本研究の触覚提示部位は前腕であり、触2点閾は約 40 mm と大きく、分解能が低いと言える。

2.2 触錯覚

視覚や聴覚と同様に触覚においても様々な錯覚現象が報告されている。文献 [41, 42] によれば、触錯覚の例として以下のようなものが挙げられる。

- 質感の錯覚 [43, 44]
- 硬さの錯覚 [45, 46]
- 温度の錯覚 [47, 48]
- 重さの錯覚 [49, 50]
- 大きさの錯覚 [51, 52]
- 形の錯覚 [53, 54]
- 空間の錯覚 [55]

このうち、触覚アクチュエータによる触覚提示範囲の拡大という本研究の目的に関連するものは、空間の錯覚である。触覚における空間の錯覚の代表例として、ファントムセン

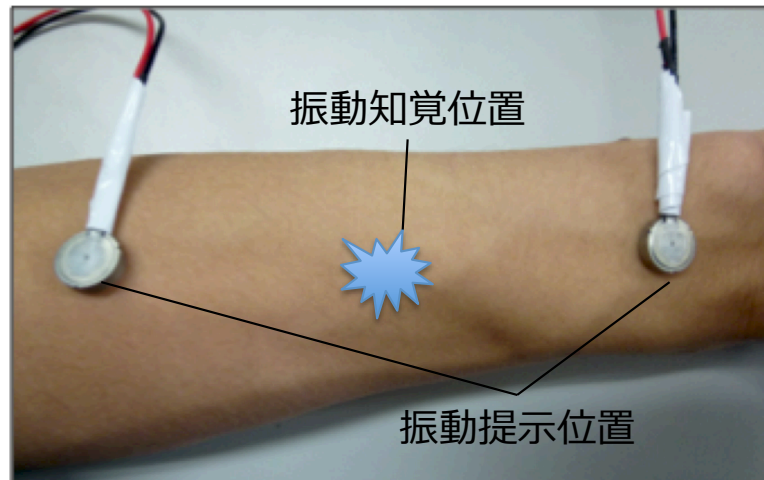


図 2.1 ファントムセンセーション

セーション [56], 皮膚兎錯覚 [57], 仮現運動 [58] が挙げられる。本研究ではファントムセンセーションを利用するため、次節でファントムセンセーションに関する詳細を述べる。

2.3 ファントムセンセーション

ファントムセンセーションとは、図 2.1 に示すように、ある距離を隔てて皮膚上に置かれた 2 個の振動刺激素子によって同時あるいは極端に短い時間感覚でほぼ等強度に刺激されると、2 刺激の中間地点に一つの振動刺激が知覚される錯覚現象である [59]。また、2 個の振動モータによる刺激強度が異なる場合は、ファントムセンセーションの触覚知覚位置は刺激の強い方へ定位する性質がある。ファントムセンセーションの適切な刺激間距離は、各研究結果で多少異なるが、前腕で 3 - 12 cm 程度と言われている [33, 56]。振動モータを用いた触覚ディスプレイにおいては、ファントムセンセーションを用いることで、2 個の振動モータ間の触覚提示が可能となる。したがって、触覚提示に必要な振動モータ数を削減する手法として有用である [60, 61]。また、皮膚兎錯覚と同様 [62] に、ファントムセンセーションも身体外の範囲に触覚刺激位置を定位することが可能であると報告されている [63]。

しかし、既存研究では、ファントムセンセーションで提示可能な範囲は 2 個の振動モータの線分上に限られている [33, 34, 64]。したがって二次元平面内での触覚提示を実現する場合には、提示範囲内を網羅するように多数の振動モータを設置しなければならないという問題がある [8, 65]。また、3 個以上の振動モータを同時に振動させることで二次元平面上のファントムセンセーションを生起させる手法も提案されている [66, 67] が、同時に振

動するモータ数が増えると触知覚位置を点として捉えることが困難になると考えられる。

本研究では、視覚刺激とファントムセンセーションを組み合わせることで触覚提示範囲を2個の振動モータの線分外に拡張することを検討する。また、視覚刺激の提示条件によるファントムセンセーションの生起確率についても検証する。

2.4 視覚と触覚のクロスモダリティ

クロスモダリティとは、複数の感覚刺激を同時に提示したときに、それらを統合して解釈する現象であり、この現象を用いることで、単体の感覚刺激とは違った感覚を提示することができるようになる。例えば、視覚刺激が触覚に影響する例として、シャルパンティエ効果やラバーハンドイリュージョンという錯覚現象が挙げられる [68, 69]。シャルパンティエ効果とは、同じ重さの物体同士を比較した場合、大きい物体の方が軽く感じるという錯覚現象であり、物体の大きさという視覚刺激によって重さという触覚刺激に対する知覚が変化したことを示唆する。ラバーハンドイリュージョンとは、被験者の片方の手とゴム手を机の上に置き、被験者からはゴム手のみが見える状況において、被験者の手とゴム手に同時に触覚刺激（ペンでつつくなど）を与え続けると、被験者は次第にゴム手が自分の手のように感じる錯覚現象であり、視覚と触覚の統合により起こる現象であると言える。

その他にも、視覚と触覚のクロスモダリティに関する研究は多数報告されている。Craig は、LED とオプタコンを用いることで指先に視覚運動刺激と触覚運動刺激を提示し、視覚運動情報が触覚刺激の運動方向知覚にどのような影響があるかを検証した [25]。実験結果より、指先に提示する上下方向の運動刺激を視覚刺激と触覚刺激が互いに逆方向になるように提示すると、触覚運動刺激の方向弁別率が低下するという知見が得られた。北崎は、VR 空間における視覚・運動システムの可塑性のメカニズムとその選択制と普遍性について考察するために、頭部運動情報と視覚情報の異なるゲインへの順応について、視覚情報量、両眼間転移、自己運動の能動性の効果を調べ、頭部の運動量と網膜に提示される視覚情報の運動量が定量的に異なるとき、位置の恒常性について、ある程度の順応が適応的に生じることを示した [70]。雨宮らは、点群の光学的流動（オプティカルフロー）の提示と同時に座席と身体の接触面で触仮現運動を生起させる刺激が与えられたときに生じる前方への移動速度感覚の変化を調べ、座面部分から提示される触仮現運動によって前進時の自己の移動速度感が促進されて知覚されたことを示した [71]。

また、AR 技術 [23] を利用して実物体の変形量や材質や色を変化させることで、ユーザが物体に抱く触印象を変化させることも可能である。Hirano らは物体を押し込んだときの

変形量を AR 技術を利用して変化させて提示することで、ユーザは多様な硬さを知覚可能であることを示した [31]. 佐々木らは、物体の硬さを識別する際に、視覚の影響が固有感覚および触覚と比べて、識別率にどの程度寄与しているのかを調査した [72]. 佐野らは、実物体に物体内の液体の揺れを想起させるような MR 型視覚刺激を重畳描画すると、揺れがある場合とない場合で知覚される力触覚が異なることが示され、揺れがある場合は物体が軽く感じられ、筋活動量も低下したと報告している [73]. 面迫らは、実物体と重心位置の異なる CG 画像を重畳描画した場合、重心位置が MR 型視覚刺激に引きずられ、知覚される重心位置が変化する錯覚現象である Shape-COG Illusion に関する研究を行っている [74]. その他にも視覚を利用した疑似触覚 (Pseudo-Haptics) の提示に関する研究は多数行われている [45, 75, 76].

視覚刺激と触覚刺激のクロスモダリティを利用して触覚位置を制御する手法も提案されている. Miyazaki らは、金属棒を両手の人差し指に載せた状態で皮膚兎錯覚を起こすと、振動が金属棒上を移動してくるように感じるが、金属棒を載せない状態で同様の皮膚兎錯覚を起こしても、そのように振動が移動するようには感じないことを報告している [62]. Lee らは、身体外の位置に触覚位置に定位させるために、視覚刺激を用いて錯覚する手法を提案している [77]. 身体外へのファントムセンセーションと皮膚兎錯覚の定位を検証する実験において、視覚刺激がない場合と AR 技術でバーチャルな身体拡張用物体がある場合とバーチャルな物体がインタラクションする場合でそれぞれの触覚位置を測定したところ、バーチャルな物体のインタラクションが身体外への触覚位置の定位に大きく寄与していることがわかった. 片岡らは、痛覚刺激提示においても視覚刺激の提示位置によって痛覚知覚位置が誘導されること、2点弁別閾が変化することを検証した [32]. 橋口らは、前腕に Mixed Reality 型視覚刺激と温度刺激提示することによる温冷覚刺激の知覚位置や知覚幅を検証し、視覚刺激提示位置と温度刺激提示位置が異なる場合、温度知覚位置は視覚刺激提示位置に引きずられることを示した [78]. このような現象から、視覚刺激はユーザの脳内のボディマップを再構成すると言われている [79, 80, 81]. ただし、触覚とボディマップの関係性については、まだ十分に解明されていない [82, 83, 84].

このように、視覚刺激を利用することで、触覚刺激を変化させなくても、触覚位置を変化させることが可能であることが示されている. これは、ヒトの空間把握において、視覚が他の感覚に比べて優位性を保持していることに起因すると考えられる. 現状の触覚アクチュエータの性能限界を補完するために、視覚刺激の優位性を利用する手法は有用であると考えられる. ただし、各研究結果で述べられている注意点として、視覚刺激から得られる情報と触覚刺激から得られる情報に大きな乖離がある場合は、視覚刺激の影響が小さくなる

とされている [32, 73, 74]. また, ユーザの注意や予測も錯覚の生起の大きな要因であると言われている [85, 86, 87]. したがって, クロスモダリティを利用した触覚ディスプレイの設計のためには, 多様な視覚刺激パターンと触覚刺激パターンで検証実験を行い, その知覚特性を明らかにする必要がある.

2.5 振動モータを用いた触覚ディスプレイ

振動刺激はスマートフォンやタブレットを始めとした携帯端末やウェアラブルデバイスに内蔵されており, 触覚フィードバックを提示するアクチュエータとして広く使われている. Fukumoto らは, タッチパネルに触覚フィードバックを付加する機構として Active Click を開発した [16]. ボイスコイルモータを利用して, 短いパルス波を印加するだけで効率的に触覚フィードバックを提示することができ, モータの設置場所によって, 携帯端末を把持した手やタッチパネルを操作する指先に振動刺激を伝えることができる.

単一の振動モータのみでも, 刺激強度や周波数を変えることで様々な振動パターンを提示してユーザに情報を伝えることができる [88, 89, 90] が, 複数の振動モータを利用したほうがより多くの情報量を伝えることができる [60]. 例えば, 振動させるモータの位置を変えたり, 複数の振動モータを順番に振動させて動きを伝えたりすることができる.

Yatani らは, SemFeel という携帯端末用触覚フィードバックシステムを提案した [91]. 端末の裏側に5個の振動モータを設置し, 仮現運動を適切に提示することで, 振動の位置や動きを示す11種類の触覚パターンを提示することが可能となり, キーボードやウェブブラウザの操作に活用することができる. また, 同様の機構で9個の振動モータを設置し, 他者との遠隔作業支援や視覚障害者へのナビゲーションに触覚フィードバックが有効であることを示した [19, 92].

Hwang らは, スマートフォンとスマートウォッチの振動子を利用した Harmonious Haptics というシステムを開発した [93]. 2個のデバイスに内蔵されている振動モータの刺激を連携させて提示することで, 材質の表現やファイル転送やUI操作に有用であると述べている. Kim らは, 触錯覚を利用して, スマートフォンやタブレットに二次元の触覚フィードバックを提示する手法を提案した [94]. ファントムセンセーションが身体外にも提示可能であるという知見を活かし, タブレットの四隅に振動モータを設置し, それぞれのモータの振幅を調節することで, タブレット端末上の5×7箇所に触知覚点を提示できることを示した. Israr らは, ゲームにおける触覚フィードバックを, 両手にはめるグローブや両手で持つタブレットに設置した2個の振動モータと触錯覚を利用して提示する手法を提案した

[95]. また、携帯端末だけでなく、触覚フィードバックを伝える椅子も開発した [8]. 椅子の背もたれ部分に12個の振動モータを取り付け、ユーザが見ている映像に合わせて振動触覚を提示するためのアルゴリズムを検討し、二次元上での触覚の動きを滑らかにするためにファントムセンセーションと仮現運動を組み合わせ、かつ従来の制御とは異なる制御法を採用することで現実感が増強されることを示した. Jinらは、スマートフォンの背面に12個の振動モータを取り付け、スマートフォンのディスプレイに表示されるバーチャル物体の位置に応じた振動刺激を提示することで、バーチャル物体の動きや位置を知覚できるシステムを開発している [96]. このように端末上に複数の振動モータを設置し、ファントムセンセーションや仮現運動を利用することで、多くの情報を伝えることができるが、一方で、触覚の空間分解能は高くないため、複数設置したモータのうち振動しているモータの位置を正確に知覚することは難しいという報告もある [97].

端末ではなくユーザの身体上に振動モータを設置する触覚ディスプレイも多数提案されている. Brownらは、ユーザの前腕に振動モータを複数設置し、振動のリズムや振幅や位置を変えて情報を伝えることで、カレンダーアプリケーションや視覚障害者用ナビゲーションに利用する手法を提案している [98]. Ghianiらは、親指と人差し指に振動モータを設置することで視覚障害者用ナビゲーションシステムを実現している [18]. Mass of Roaches!は、前腕に装着した振動モータによる触覚刺激と同一の位置に映像を提示することでユーザの触覚感覚を増幅させるデバイスである [99]. 触覚提示にファントムセンセーションを利用することで、振動モータのない位置にも振動刺激を定位させている. 視覚刺激を組み合わせることで、ファントムセンセーションで提示した振動刺激をより感じやすくなったという結果が報告されている. 高瀬らは、HMDと触覚グローブとスピーカを用いることで、手のひら上を動くバーチャルキャラクタの動きを視覚、触覚、聴覚で提示するシステムを構築している [100]. 触覚グローブのアクチュエータには糸状に加工した形状記憶合金を用いており、ファントムセンセーションや仮現運動を組み合わせることで触覚を提示している. マーカを利用した手のひらの位置検出を行っており、手を傾けたり上下に動かしたりすることでバーチャルキャラクタが滑り落ちたり跳ね回ったりするというインタラクションも可能となっている. 評価実験により、視聴覚に合わせて触覚を提示することで現実感が増強されるという知見が報告されている. 福山らは、糸状に加工した形状記憶合金を利用した微小振動アクチュエータを備えた触覚ディスプレイを開発し、視覚刺激と組み合わせることで、リアリティのある触覚提示を行うことを検討している [101]. 評価実験より、視覚情報が触覚認識に有意に影響を与えていることが示され、適切な視覚刺激の作成と選定を行うことが重要であると述べている.

複数の振動モータを用いた触覚ディスプレイを利用する場合、振動知覚位置は触覚フィードバックによる情報伝達の重要な要素の一つである。視覚刺激により触覚位置や触覚点数を制御する本研究の提案手法は、複数の振動モータを用いる触覚ディスプレイの設計に有用であると言える。

第3章 単数の視覚刺激提示が触知覚位置に与える影響

3.1 はじめに

本章では初期検討として、視触覚刺激提示環境下において単数の視覚刺激が触知覚に与える影響について検証する。触覚刺激は振動モータによる振動刺激とし、視覚刺激は拡張現実感技術を用いてカメラ映像にバーチャル物体を合成して提示する。本章で検証する項目は以下のとおりである。

1. 振動モータにより直接触覚提示した場合とファントムセンセーションを利用して触覚提示した場合における触知覚位置。
2. 2個の振動モータの線分上で、触覚刺激のみを提示した場合と視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示した場合における触知覚位置。
3. 2個の振動モータの線分上で、視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示した場合における触知覚位置。
4. 2個の振動モータの線分上で、バーチャル物体の動きの軌跡を提示した場合の触知覚位置。
5. 二次元平面上において、視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示した場合の触知覚位置。

3.2 仮説

人間の前腕における二点弁別閾は 40 mm 程度であり [40]、触覚刺激提示のみでは振動刺激提示位置を正確に知覚することは難しいと言える [34]。したがって触覚刺激と視覚刺激を同時に提示した場合は、視覚刺激の影響を受けて触知覚位置が変化する可能性が高いと考えられる。以上の仮定に基づいて筆者らは以下の仮説を設定した。

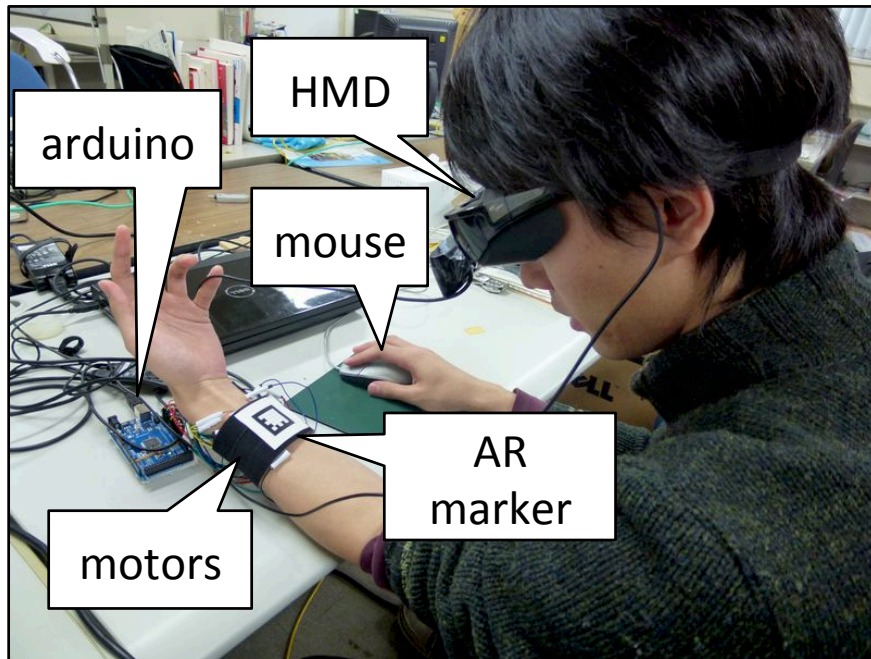


図 3.1 実験装置を装着した様子

1. 視覚刺激と触覚刺激を同じ位置に提示することにより触覚刺激の提示位置を正確に知覚しやすくなる.
2. 視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示すると触覚位置は視覚提示位置方向に転移する. ただし, 視覚提示位置と触覚提示位置間の距離が長くなるほどその影響力が弱まる.

3.3 実験環境

本節では, 基礎検討時の実験環境について述べる. 図 3.1 に示すように, 被験者は, 頭部にウェブカメラ (ロジクール HD Pro Webcam C910) を付けた HMD (Vuzix Wrap 920) を装着し, 左の前腕部内側に振動モータおよび AR マーカを装着した. システム構成を図 3.2 に示す. カメラで取得した映像に AR 技術によるバーチャル物体を重ね合わせた映像が HMD に出力される. バーチャル物体の提示には ARToolKit [102] を用いる. 振動モータ (FM34F) はマイコン (Arduino) によって制御されており, 視覚刺激と同期して触覚刺激が提示される. 振動モータの直径は約 10 mm であり, 周波数約 200 Hz で振動し, 信号が

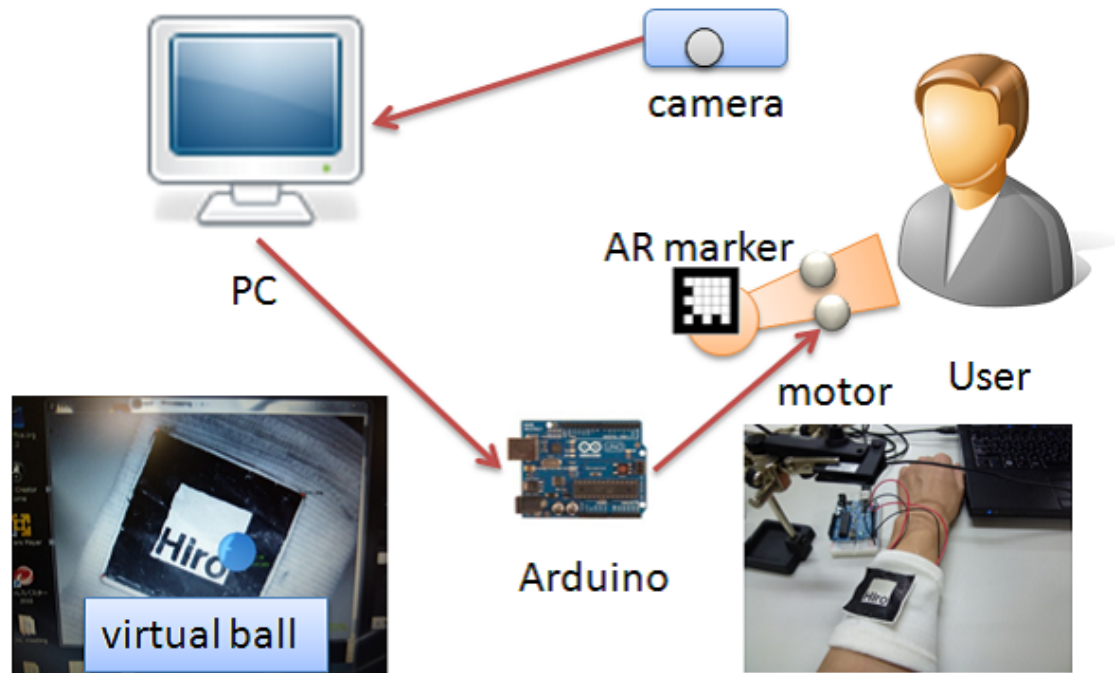


図 3.2 実験システム構成

送られてから振動するまでの遅延時間は約 100 ms である。周波数を 200 Hz に設定した理由は、振動刺激を知覚するためのパチニ小体が最も発火しやすいからである [56]。被験者は、HMD に表示されている映像を見ながら、震えていると感じる位置（触知覚位置）を右手に持ったマウスでクリックして回答した。

3.4 実験1：ファントムセンセーション提示時の触知覚位置の検証

2 個の振動モータによるファントムセンセーション提示時に、触知覚位置が 2 個の振動モータ間に定位するかについて検証した。本実験の参加者は 4 名（26 - 37 歳の男性 4 名）であった。

3.4.1 実験方法

被験者の左前腕部に、図 3.3 に示すように 9 個の振動モータを格子状に配置した。既存研究の知見を参考に、各モータの中心間距離は 20 mm とした。振動パターンは、1 個の振動モータが振動する場合の 9 通りと、2 個の振動モータが振動する場合の 36 通りを合わせて、45 通りとした。モータの印加電圧を 3 V、振動時間を 1 秒とした。

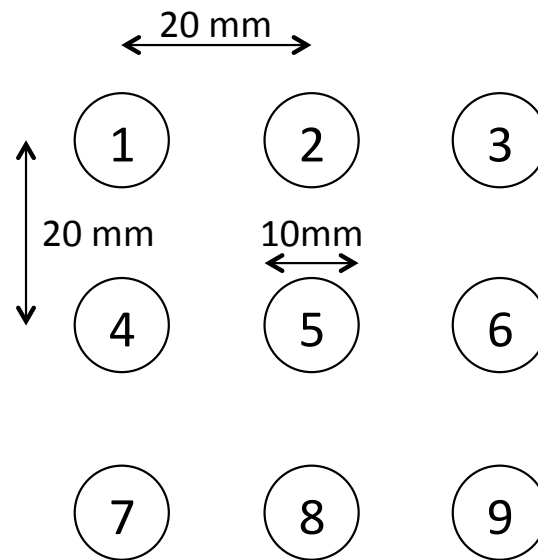


図 3.3 振動モータの配置図

被験者は各振動パターン提示時に、どのモータが震えていると感じるかを HMD に表示されている映像をクリックすることで回答し、各試行での触覚提示位置と触知覚位置を記録した。触覚提示位置は以下のように定めた。

- 1 個の振動モータが振動している場合は、その振動モータ位置を触覚提示位置とする。
- 2 個の振動モータが振動している場合は、2 個の振動モータの中間の位置を触覚提示位置とする。

提示される振動パターンの順番は被験者ごとにランダムとし、各被験者の試行回数は 500 回とした。

3.4.2 実験結果と考察

1 個の振動モータによる実振動刺激提示時と 2 個の振動モータによるファントムセンセーション提示時の触知覚位置を比較するため、触覚提示位置が “2”, “4”, “5”, “6”, “8” の場合における触覚提示位置と触知覚位置の距離を計算した。実験結果を図 3.4 に示す。例えば、触覚提示位置が “2” の場合は、“2” の位置の振動モータ 1 個を振動させた場合（実振動刺激）の触覚提示位置と触知覚位置の距離と、“1” と “3” の位置の 2 個の振動モータを振動させた場合（ファントムセンセーション）の触覚提示位置と触知覚位置の距離を算出し

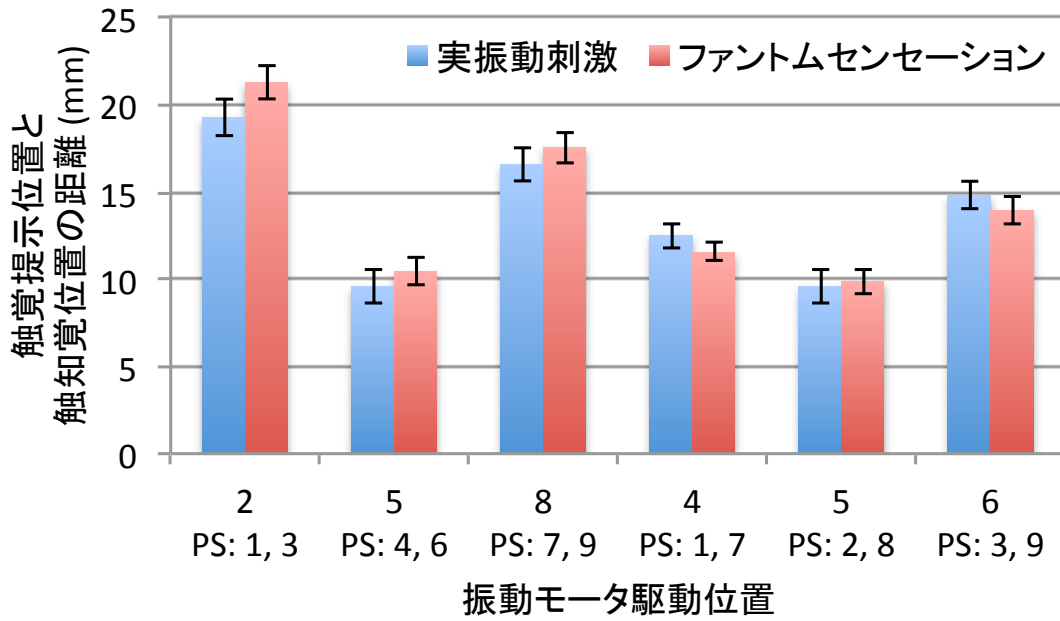


図 3.4 実振動刺激提示時とファントムセンセーション (PS) 提示時における触覚提示位置と触知覚位置の距離

表 3.1 触覚提示位置と印加電圧

触覚提示位置 [mm]	左モータ電圧 [V]	右モータ電圧 [V]
0	3.0	0
10	2.75	2.25
20	2.5	2.5
30	2.25	2.75
40	0	3.0

た。触覚提示位置が“5”の場合のみ、ファントムセンセーション提示条件として駆動させた振動モータが“1”と“3”の場合と、“2”と“5”の場合の距離を算出した。Bonferroni 法による多重比較を行なったところ、各触覚提示位置において、実振動刺激の場合とファントムセンセーションの場合で、触覚提示位置と触知覚位置の距離に有意差は認められなかった ($p > .05$)。したがって、既存研究の結果と同様、40 mm 程度離れた2個の振動モータが同時に振動した場合、その中間の位置にファントムセンセーションが生起されることが確認できた。

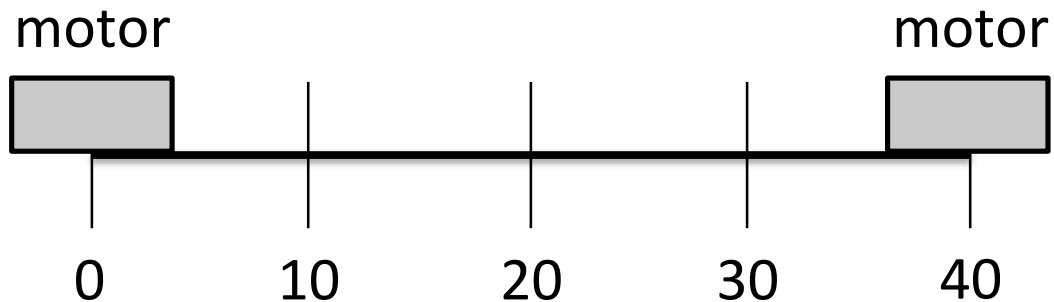


図 3.5 5箇所の触覚提示位置

3.5 実験2: 視触覚刺激を同位置に提示した場合の触知覚位置の検証

視触覚刺激提示環境下において、視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示した場合の触知覚位置を検証した。本実験の参加者は7名(23 - 37歳の男性5名, 女性2名)であった。

3.5.1 実験方法

被験者の左前腕部に2個の振動モータを40 mm間隔で手首と平行の向きで設置した。最初に触覚刺激のみを提示した場合の触知覚精度を測定した。触覚提示位置は2個のモータを結ぶ線分上に5箇所設定した。左側の振動モータからの距離を基準に0 mmから40 mmまで10 mm間隔で触覚提示位置を設定し、それぞれの位置に応じた電圧を両端の振動モータに加えた(図3.5)。振動モータ間の触覚提示にはファントムセンセーションを利用した[56]。各提示位置と電圧の関係は表3.1の通りである。触覚提示位置は5箇所の中からランダムで選択され、被験者が触知覚位置を回答するまで同じ強さで振動し続けた。振動モータによる触覚提示位置と被験者が震えていると感じた触知覚位置の距離を測定した。被験者には振動モータの正確な位置や触覚提示位置に関することは伝えなかった。各被験者の試行回数は50回とした。

次に視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示した場合の触知覚精度を測定した。触覚提示位置は表3.1の通りであり、さらに同じ位置に半径5 mmのバーチャルボールを提示した。被験者には視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示することは伝えなかった。各被験者の試行回数は50回とした。

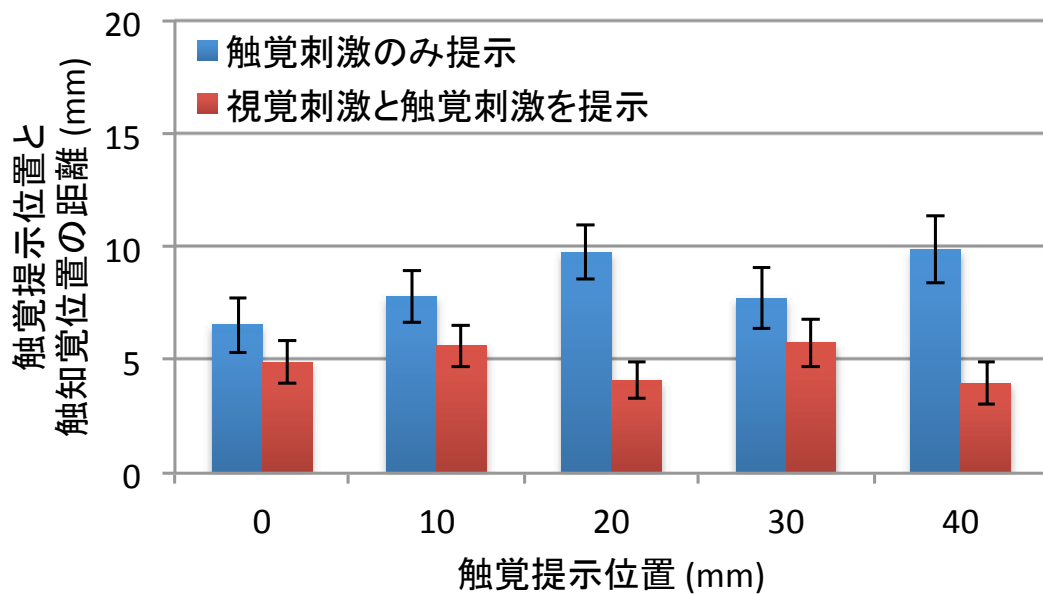


図 3.6 触覚刺激のみを提示した場合と視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示した場合の触覚提示位置と触覚位置の距離

3.5.2 実験結果と考察

触覚刺激のみを提示した場合と視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示した場合の実験結果を図 3.6 に示す。触覚提示位置 20 mm, 40 mm のときに、触覚刺激のみ提示した場合には触覚提示位置と触覚位置の間に 10 mm 程度の誤差が生じていたが、視覚刺激を加えることで誤差が 5 mm 程度に減少した。視覚刺激の有無により触覚提示位置と触覚位置の距離に有意差があるかを調べるために Tukey-Kramer 法による多重比較を行ったところ、触覚提示位置 20 mm, 40 mm の条件下において $p < .01$ となり、有意水準 1% で有意差が認められた。その他の触覚提示位置では有意差が認められなかったが、すべての触覚提示位置において触覚提示位置と触覚位置の距離は小さくなった。したがって、視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示することで、より正確に意図した位置に触覚提示を行うことができると考えられる。

3.6 実験3：視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示した場合の触知覚位置の検証

視覚刺激提示環境下において、視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示した場合の触知覚位置を検証した。本実験の参加者は7名(23 - 37歳の男性5名, 女性2名)であった。

3.6.1 実験方法

実験2と同様に、被験者の左前腕部に2個の振動モータを40 mm間隔で手首と平行の向きで設置した。半径5 mmのバーチャルボールによる視覚刺激と振動モータによる触覚刺激を異なる位置に提示し、被験者に振動していると感じる触知覚位置を回答させた。触覚提示位置は、実験2と同様に5箇所とした(表3.1)。視覚提示位置は、40 mm間隔で置かれた2個の振動モータ間の線分上とし、両端の振動モータ位置を含めて5 mm間隔で9箇所設定した。視覚提示位置と触覚提示位置はランダムで決定され、振動刺激は被験者が回答するまで同じ強さで提示し続けた。この時、視覚提示位置と触覚提示位置の距離は最小で0 mm, 最大で40 mmとなる。視覚提示位置と触知覚位置の距離と触覚提示位置と触知覚位置の距離をそれぞれ測定した。被験者には視覚提示位置と触覚提示位置が必ずしも一致しないことを伝えた。各被験者の試行回数は100回とした。

3.6.2 実験結果と考察

N-1回目からN回目にかけて刺激提示位置が動く方向を移動方向と定義し(図3.7)、実験結果を視覚刺激の移動方向と触覚刺激の移動方向が同じ場合(図3.8)と異なる場合(図3.9)に分けて解析した。どちらの場合も視覚提示位置と触覚提示位置の距離が15 mm以下の場合には視覚提示位置付近を触知覚する傾向が見られるが、20 mm以上になると視覚提示位置よりも触覚提示位置付近を回答する傾向があることがわかった。移動方向が同じ場合において、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が0 mmの場合の視覚提示位置と触知覚位置の距離と、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が5 - 40 mmの場合の視覚提示位置と触知覚位置の距離における有意差、および、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が0 mmの場合の触覚提示位置と触知覚位置の距離と、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が5 - 40 mmの場合の触覚提示位置と触知覚位置の距離における有意差を検証するためにTukey-Kramer法による多重比較を行なった結果を表3.2に示す。同様に、移動方向が異なる場合における各刺激提示位置と触知覚位置の距離について、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が0

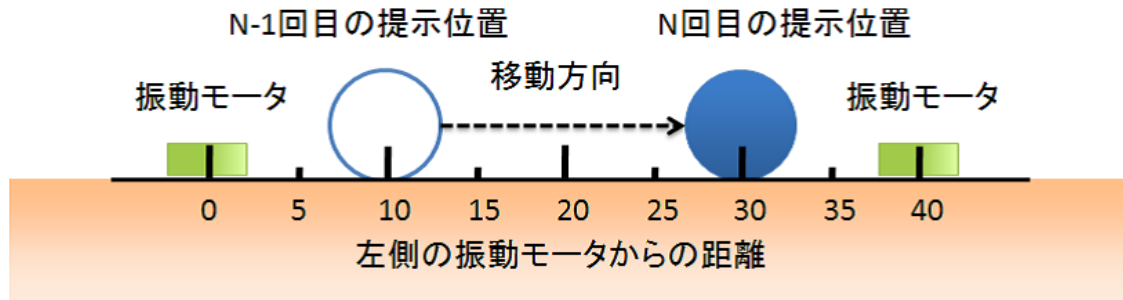


図 3.7 移動方向の定義

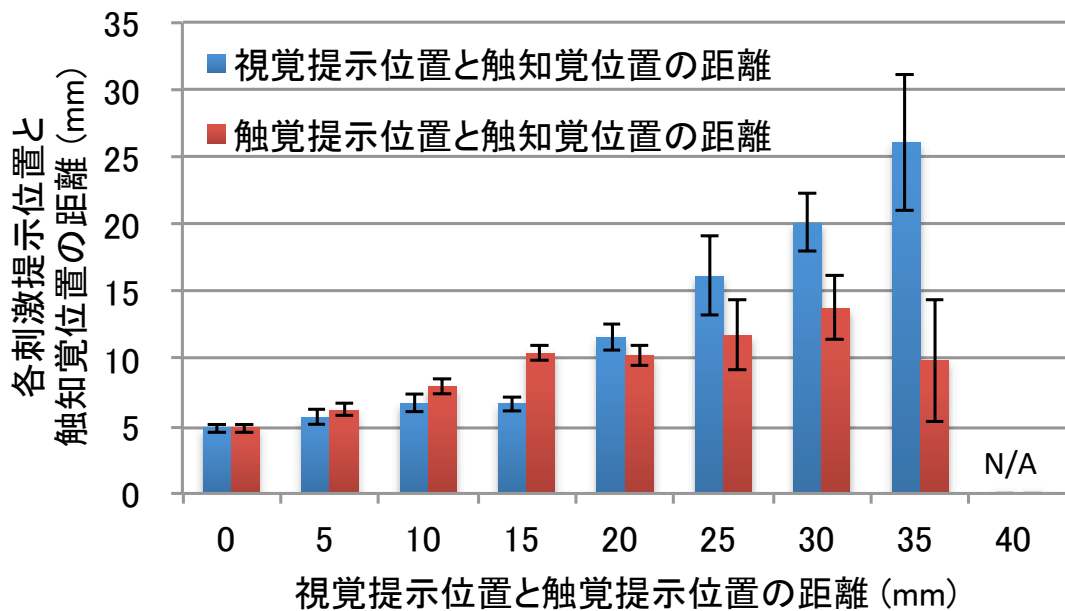


図 3.8 移動方向が同じ場合の各刺激提示位置と触覚位置の距離

mm の場合とその他の場合の有意差を検証するために Tukey-Kramer 法による多重比較を行なった結果を表 3.3 に示す。多重比較において、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 0 mm の場合の各刺激提示位置と触覚位置の距離と、その他の条件下での各刺激提示位置と触覚位置の距離に有意差がない場合は、各刺激提示位置付近で振動を感じていると考えられる。多重比較の結果から、以下のことが言える。

視覚刺激と触覚刺激の移動方向が同じ場合、

- 視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 5 mm の場合は、視覚提示位置および触覚提

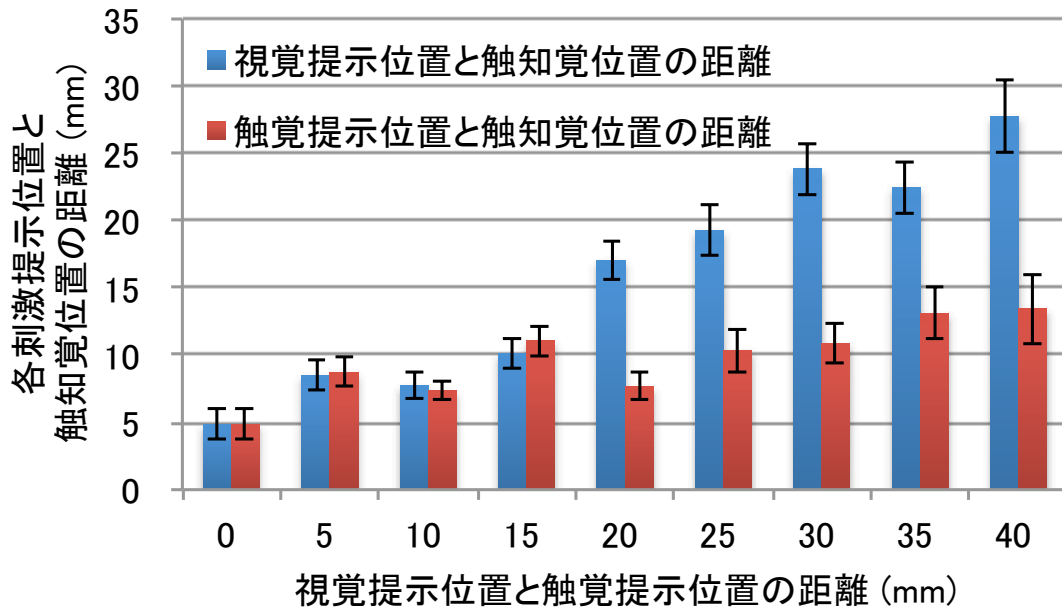


図 3.9 移動方向が異なる場合の各刺激提示位置と触知覚位置の距離

表 3.2 移動方向が同じ場合の多重比較結果

視覚提示位置と触覚提示位置の距離	視覚提示位置と触知覚位置の距離	触覚提示位置と触知覚位置の距離
5	$p > .05$	$p > .05$
10	$p > .05$	$p < .01$
15	$p > .05$	$p < .01$
20	$p < .01$	$p < .01$
25	$p < .01$	$p < .05$
30	$p < .01$	$p < .01$
35	$p < .01$	$p > .05$
40	N/A	N/A

示位置付近が震えていると感じる。

- 視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 10 - 15 mm の場合は、触知覚位置に関して視覚提示位置が支配的となり、視覚提示位置付近が震えていると感じる。
- 視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 20 - 30 mm の場合は、触知覚位置は視覚提示位置と触覚提示位置の両方の影響を受け、視覚提示位置と触覚提示位置の間が震えて

表 3.3 移動方向が異なる場合の多重比較結果

視覚提示位置と 触覚提示位置の距離	視覚提示位置と 触覚位置の距離	触覚提示位置と 触覚位置の距離
5	$p > .05$	$p > .05$
10	$p > .05$	$p > .05$
15	$p > .05$	$p > .05$
20	$p < .01$	$p > .05$
25	$p < .01$	$p > .05$
30	$p < .01$	$p > .05$
35	$p < .01$	$p > .05$
40	$p < .01$	$p > .05$

いると感じる。

- 視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 35 mm の場合は、触覚位置に関して触覚提示位置が支配的となり、触覚提示位置付近が震えていると感じる。

視覚刺激と触覚刺激の移動方向が異なる場合、

- 視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 5 - 15 mm の場合は、視覚提示位置および触覚提示位置付近が震えていると感じる。
- 視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 20 - 40 mm の場合は、触覚位置に関して触覚提示位置が支配的となり、触覚提示位置付近が震えていると感じる。

したがって、視覚提示位置が触覚位置に影響を与える条件は、

- 移動方向が同じ場合は、視覚刺激と触覚刺激の提示位置が 30 mm 以下。
- 移動方向が異なる場合は、視覚刺激と触覚刺激の提示位置が 15 mm 以下。

と言える。視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 15 - 30 mm 以下の場合には視覚提示位置が触覚位置に影響を与える理由は、前腕の二点弁別閾が約 40 mm であることに関係があるのではないかと考えられる [40]。すなわち、触覚位置に関して、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が二点弁別閾以下の距離である場合は視覚提示位置が支配的になり、二点弁別閾以上の距離である場合は触覚提示位置が支配的になると考えられる。一方、視覚刺激と触覚刺激の移動方向が同じ場合は、移動方向が異なる場合に比べて、視覚提示位置付近を回答する傾向が強いことがわかった。移動方向が同じ場合と異なる場合における視

覚提示位置と触知覚位置の距離について Tukey-Kramer 法を用いて多重比較を行なったところ、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 20 mm の場合に有意水準 5 % で有意差が認められた。その他の刺激提示距離では有意差は見られなかったが、すべての刺激提示距離において視覚刺激と触覚刺激の移動方向が同じ場合の方が視覚提示位置と触知覚位置の距離が小さくなった。したがって、視覚刺激と触覚刺激の移動方向を統一することによって視覚刺激の影響力が強まると考えられる。

3.7 実験4：バーチャル物体の動きの違いが触知覚に与える影響の検証

バーチャル物体の動きの違いによって触知覚位置に変化があるかを検証した。本実験の参加者は4名(23 - 37歳の男性)であった。

3.7.1 実験方法

実験3と同様に、被験者の左前腕部に2個の振動モータを40 mm 間隔で手首と平行の向きで設置し、視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示し、被験者に触知覚位置を回答させた。触覚提示位置は5箇所(表3.1)、視覚提示位置は2個の振動モータ間の線分上とし、5mm 間隔で9箇所設定した。実験3ではバーチャルボールは視覚提示位置に静止していたが、実験4ではバーチャルボールは被験者が触知覚位置を回答するまで視覚提示位置上を高さ10 mm で1秒間隔で跳ねた。バーチャルボールが静止している状態では振動を提示し続け、バーチャルボールが跳ねている状態では接地に合わせて振動を提示した。被験者が回答すると、次の提示位置へ放物線を描いて移動した。放物線の高さの最大値は移動距離の半分とした。実験3のときの視覚提示位置と触知覚位置の距離と実験4のときの視覚提示位置と触知覚位置の距離を比較して、バーチャル物体の動きを変えたことで触知覚位置に変化が表れるかを検証した。被験者には視覚提示位置と触覚提示位置が必ずしも一致しないことを伝えた。試行回数は100回とした。

3.7.2 実験結果と考察

被験者4名の実験3と実験4における視覚提示位置と触知覚位置の距離の結果を図3.10に示す。すべての刺激提示距離において、バーチャルボールを跳ねさせて提示した場合(実験4)の方が静止して提示した場合(実験3)に比べて視覚提示位置と触知覚位置の距離が

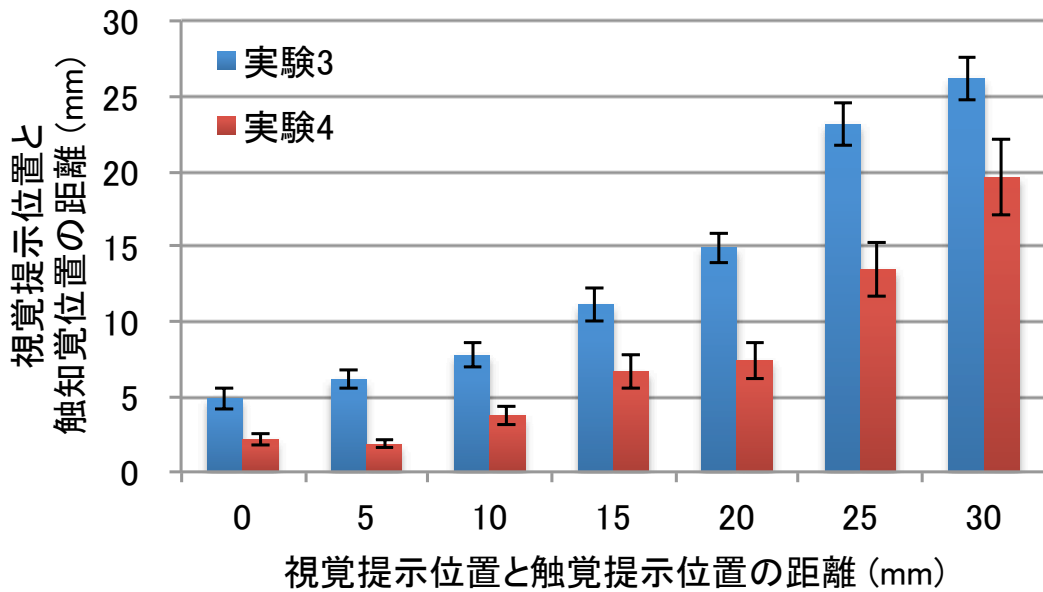


図 3.10 視覚提示位置と触知覚位置の距離

短くなった。バーチャルボールの動きの違いにより視覚提示位置と触知覚提示位置の距離に有意差があるかを調べるために、Tukey-Kramer法による多重比較を行ったところ、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が5 mmの場合 ($p < .05$) と20, 25, 30 mmの場合 ($p < .01$) にそれぞれ有意差が認められた。したがって、バーチャルボールを跳ねさせた方が視覚刺激の影響力が増加して視覚提示位置付近を触知覚位置と認識しやすくなると考えられる。視覚刺激の影響力が増加した要因として以下の2つが考えられる。1つ目の要因は、軌跡表示による振動刺激位置の予測である。バーチャルボールが放物線の軌跡を描いて移動すると、被験者は振動を知覚する前から次の振動位置を予測することが無意識に行われていると考えられる。このため、軌跡表示によって示された位置付近に触覚提示がなされると、視覚刺激と触覚刺激が多少異なった位置に提示されていても視覚提示位置が震えていると錯覚するのではないかと考えられる。2つ目の要因は、ボールが跳ねるという視覚刺激と振動モータによる振動刺激の間の違和感の減少である。実験後の被験者の感想としてボールを跳ねさせた場合の方が刺激位置がわかりやすいという意見があったことから違和感が少なくなったと考えられる。このように視覚刺激としてのバーチャル物体の提示方法によって触知覚に与える影響力は変化し、視覚刺激と触覚刺激の間の違和感が少ないほど視覚の影響力が増加すると言える。

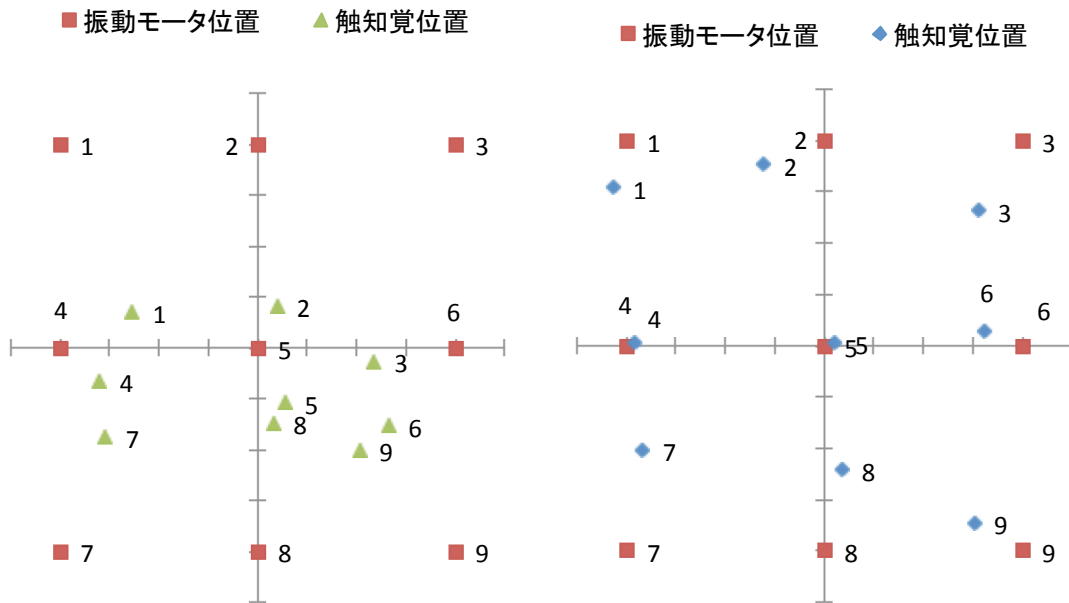


図 3.11 触覚刺激のみ提示した場合

図 3.12 視触覚刺激を同位置に提示した場合

3.8 実験5：二次元平面上において視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示した場合の触知覚位置の検証

二次元平面上において、視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示した場合の触知覚位置を検証した。本実験の参加者は4名(24 - 26歳の男性)であった。

3.8.1 実験方法

実験1と同様に、被験者の左前腕部に、図3.3に示すように9個の振動モータを格子状に配置し、各モータの中心間距離は20mmとした。振動パターンは、1個の振動モータが振動する場合の9通りと、2個の振動モータが振動する場合の36通りを合わせて、45通りとした。視覚刺激として、半径5mmのバーチャルボールを図3.3の“1”から“9”のいずれかの位置に提示した。バーチャルボールは被験者が触知覚位置を回答するまで視覚提示位置を高さ10mmで1秒間隔で跳ねた。バーチャルボールの接地に合わせて振動刺激を提示した。視覚刺激と触覚刺激の提示位置はランダムに選ばれ、被験者は触知覚位置を回答した。試行回数は500回とした。

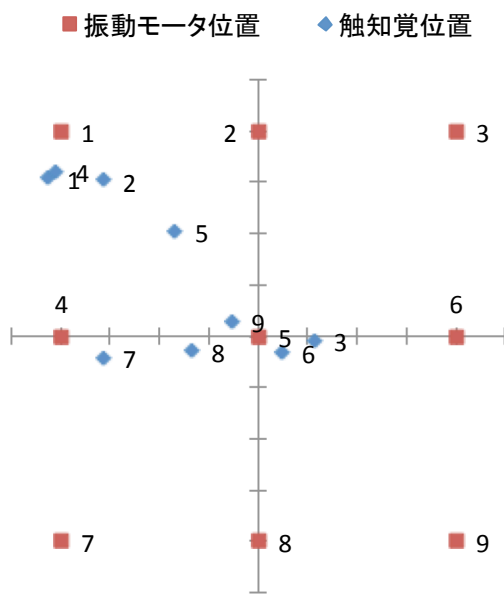


図 3.13 視覚刺激が“1”の位置の場合

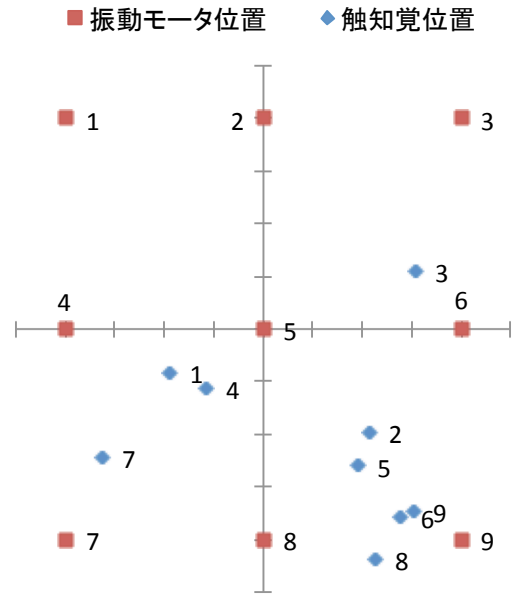


図 3.14 視覚刺激が“9”の位置の場合

3.8.2 実験結果と考察

二次元平面上における視覚刺激の影響を定性的に評価するために、まず、“1”から“9”の位置の振動モータが1個震えている場合における触知覚位置を抽出した。実験1において振動モータが1個震えている場合の触知覚位置を図3.11に、実験5において視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示した場合の触知覚位置を図3.12に、視覚刺激を“1”の位置に提示した場合の触知覚位置を図3.13に、視覚刺激を“9”の位置に提示した場合の触知覚位置を図3.14に示す。それぞれの図における赤点は振動モータの位置を示し、図3.11の緑点およびその他の図の青点は触知覚位置を表す。各触知覚位置の番号と振動モータの番号は対応している。図3.11と図3.12より、二次元平面上においても、視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示した場合は、触覚提示位置と触知覚位置の距離が短くなった。また、図3.13および図3.14より、視覚提示位置と触覚提示位置が異なる場合は、視覚提示位置方向へ触知覚位置が転移することが示された。

3.9 まとめ

本章では、視触覚刺激提示環境下において、視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示した場合に、視覚提示位置に触知覚位置が転移することを検証するための初期検討として、単数の視覚刺激提示を用いて、以下の項目について検証実験を行なった。

1. 振動モータにより直接触覚提示した場合とファントムセンセーションを利用して触覚提示した場合における触知覚位置。
2. 2個の振動モータの線分上で、触覚刺激のみを提示した場合と視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示した場合における触知覚位置。
3. 2個の振動モータの線分上で、視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示した場合における触知覚位置。
4. 2個の振動モータの線分上で、バーチャル物体の動きの軌跡を提示した場合の触知覚位置。
5. 二次元平面上において、視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示した場合の触知覚位置。

検証実験の結果から、各項目について以下の結論が示された。

1. 振動モータの実振動刺激による触覚提示の場合とファントムセンセーションによる触覚提示の場合では、触覚提示位置と触知覚位置の距離に有意差は見られなかった。
2. 触覚刺激のみを提示した場合に比べて、視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示した場合は、触覚提示位置と触知覚位置の距離が短くなった。
3. 視覚提示位置と触覚提示位置の距離が15 - 30 mm以内の場合は視覚刺激の影響により触知覚位置が視覚提示位置へ転移した。また、連続した刺激提示の場合、視覚刺激の影響力は視覚刺激と触覚刺激の移動方向が同じ場合に強まった。
4. 視覚刺激の動きと振動刺激の違和感を減少させることで、視覚刺激の影響力が強まった。
5. 二次元平面上においても、一次元の場合と同様に、視覚提示位置方向に触知覚位置が転移した。

第4章 複数の視覚刺激提示が触知覚位置に与える影響

4.1 はじめに

本章では、視触覚刺激提示環境下において複数の視覚刺激が触知覚に与える影響について検証する。触覚刺激は振動モータによる振動刺激とし、視覚刺激はLEDによる光刺激とする。本章で検証する項目は以下のとおりである。

1. 複数の視覚刺激がファントムセンセーションの生起に与える影響。
2. 複数の視覚刺激提示が触知覚位置の定位に与える影響。

4.2 実験装置

本章での検証実験で用いる視触覚ディスプレイを図 4.1 に、前腕に装着した様子を図 4.2 に示す。視覚刺激提示用にLEDテープ (Adafruit 社製, NeoPixel Digital RGB LED Strip) を利用し、触覚刺激提示用に振動モータ (東京パーツ工業社製, FM34F) を利用した。図 4.3 に示すように、LED テープを前腕内側に 20 mm 間隔で 3 列設置し、1 列につき 5 個のLEDと振動モータを設置した。設置部位を前腕とした理由は、触知覚の空間分解能が低く [103]、ファントムセンセーションが起りやすいからである [33, 34]。各列の間隔を 20 mm とした理由は、これまでの研究成果から、視覚刺激と振動刺激を同時に提示した場合、視覚刺激と触覚刺激の提示位置の距離が 20 mm 以内のときにクロスモーダル知覚が生じやすいからである。それぞれのLEDの中心と振動モータの中心が一致するように設置しており、各LED間および振動モータ間は約 17mm である。LEDおよび振動モータはマイコン (Arduino 社製, Arduino Uno) によって制御する。振動モータのサイズは約 10 mm で、振動を知覚する皮膚の機械受容体のパチニ小体が発火しやすいといわれる 200 Hz の周波数で振動させる [56]。

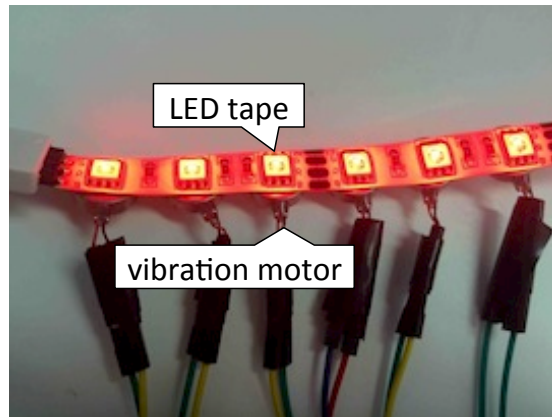


図 4.1 LED と振動モータを用いた視触覚ディスプレイ

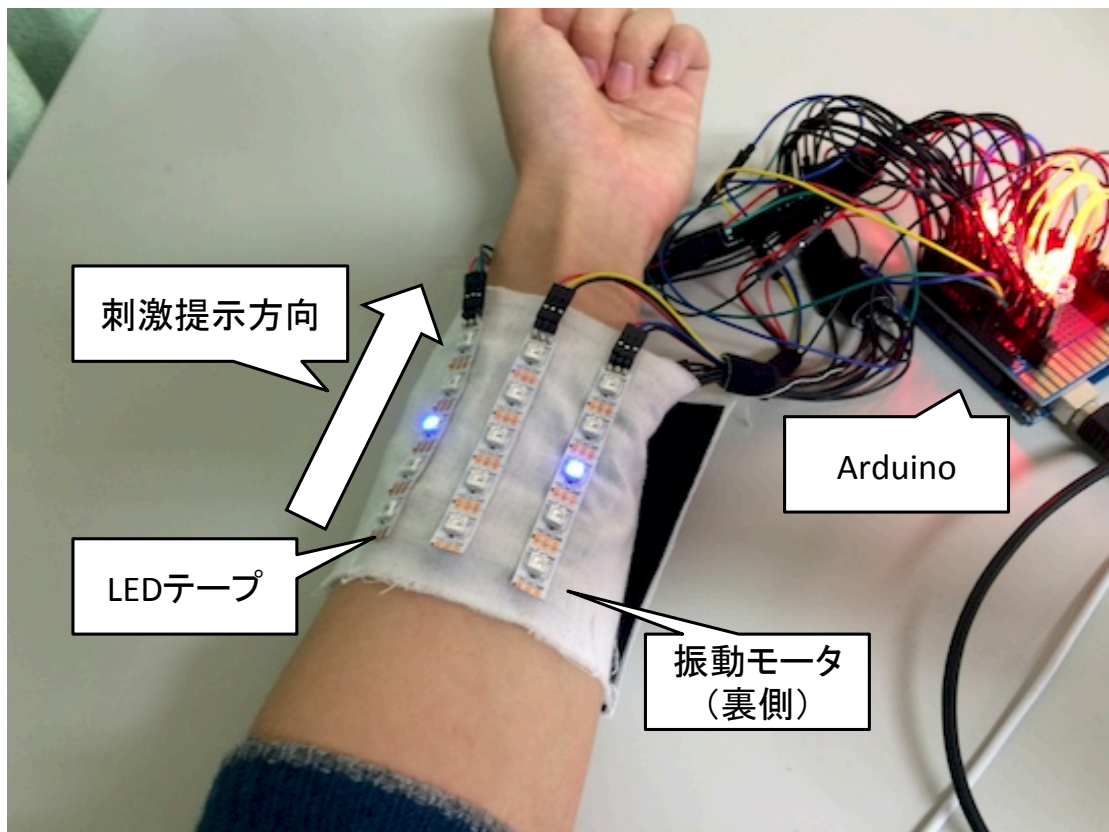


図 4.2 視触覚ディスプレイの装着図

4.3 複数の視覚刺激がファントムセンセーションの生起に与える影響に関する検証実験

4.3.1 仮説

視覚刺激が触知覚に影響を与えるという従来研究の見解および筆者らのこれまでの研究成果から、視覚刺激によってファントムセンセーションの生起を制御することが可能であ

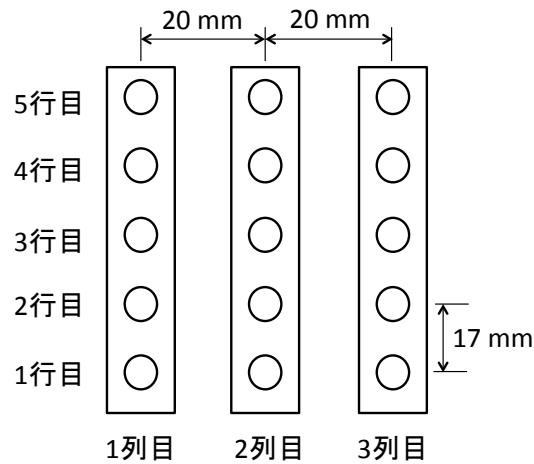


図 4.3 ディスプレイの配置図

るといふ仮説を立てる。皮膚上の空間的に離れた2点に振動モータを配置した場合におけるファントムセンセーションの生起の制御に関する仮説は以下の通りである。

1. 2個の振動モータの中間位置に1個の視覚刺激を提示した場合はファントムセンセーションの生起を促進する
2. 2個の振動モータと同じ位置に2個の視覚刺激を提示した場合はファントムセンセーションの生起を抑止する

図 4.4 に示すように、異なる2個の振動モータを振動させ、それらの中間に位置するLEDを点灯させる場合は、ファントムセンセーションの提示位置に視覚刺激が提示されているので、ファントムセンセーションの生起が促進されると考えられる。図 4.5 に示すように、異なる2個の振動モータを振動させ、それらの位置と同じ位置のLEDを2個点灯させる場合は、LEDが点灯している両端の2点が振動しているように感じられ、ファントムセンセーションの生起が抑制されると考えられる。

4.3.2 実験1：視覚刺激がファントムセンセーションの生起に与える影響に関する検証実験

同一の触覚刺激に対して異なる視覚刺激を提示することで、視覚刺激がファントムセンセーションの生起確率に与える影響を検証した。本実験の参加者は、20代から60代の男性35名であった。

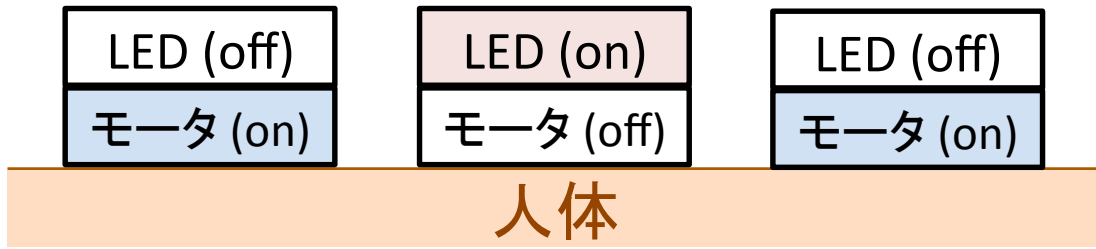


図 4.4 ファントムセンセーションの生起を促進する刺激提示例

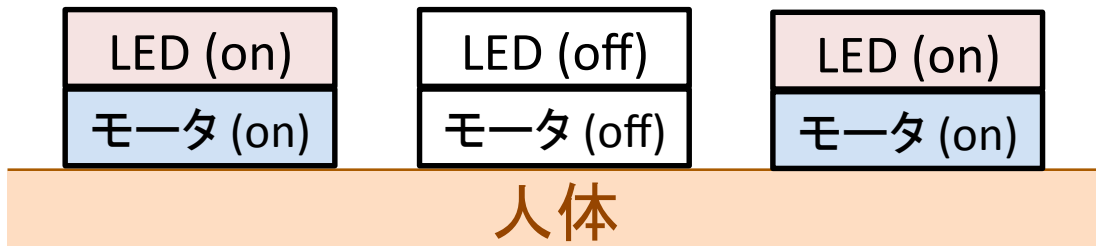


図 4.5 ファントムセンセーションの生起を抑止する刺激提示例

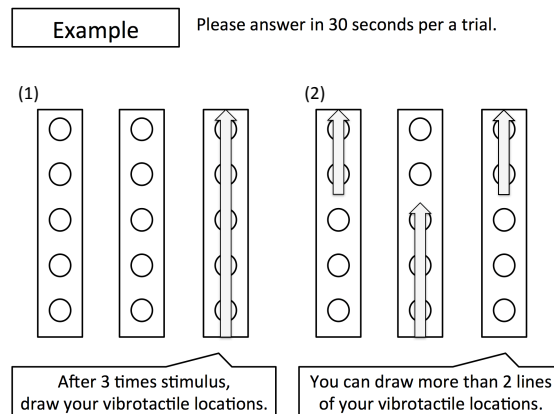


図 4.6 被験者への回答指示用紙

実験方法

図 4.2 に示すように、肘から手首の方向へ 1 行ずつ順に、視覚刺激と触覚刺激を同期させて提示した。また、モータの振動音が聞こえにくい騒音環境下での実験だったため、振動音を遮断する必要はないと考え、被験者にホワイトノイズを提示することはしなかった。

実験手順は以下の通りである。まず、デモンストレーションとして視覚刺激と触覚刺激を提示し、図 4.6 を用いて回答方法を説明した。ただし、被験者に視覚刺激と触覚刺激の

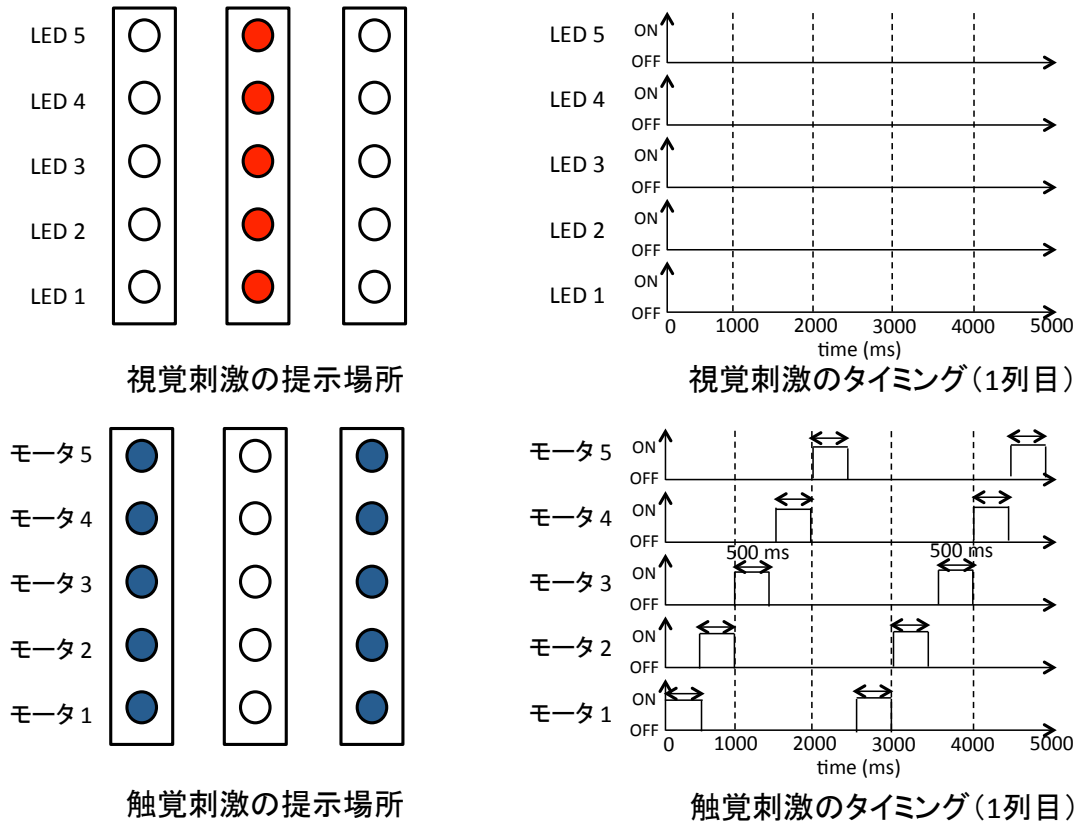


図 4.7 刺激パターン (1 回目)

関係は説明しなかった。次に、被験者が自身の前腕を見ている状態で刺激提示を行い、刺激提示後に被験者は各行ごとに震えていると感じた場所を回答用紙にチェックで印をつけて回答し、1 行内で複数の位置が震えていると感じた場合は、それらの位置を全て記入することとした。被験者の回答後に次の刺激パターンによる刺激提示を行い、同様に回答させた。視覚刺激および触覚刺激の刺激パターンを変えながら、合計 3 種類の刺激提示を行った。各刺激パターンを図 4.7 から図 4.9 に示す。それぞれの図中の色付きの LED および振動モータによって刺激提示を行った。触覚刺激の刺激パターンは全ての試行で共通であり、各行の 1 列目と 3 列目の振動モータを同時に振動させるという刺激パターンで提示した。視覚刺激の刺激パターンは各試行ごとに異なっており、1 回目は 2 列目の LED を順に点灯させ、2 回目は 1 列目および 3 列目の LED を点灯させ、3 回目は 1, 3 列目と 2 列目を交互に点灯させた。各行における LED と振動モータの刺激提示タイミングは同期しており、刺激提示時間は 500 ms とした。刺激時間を 500 ms とした理由は、予備実験より、ファントム

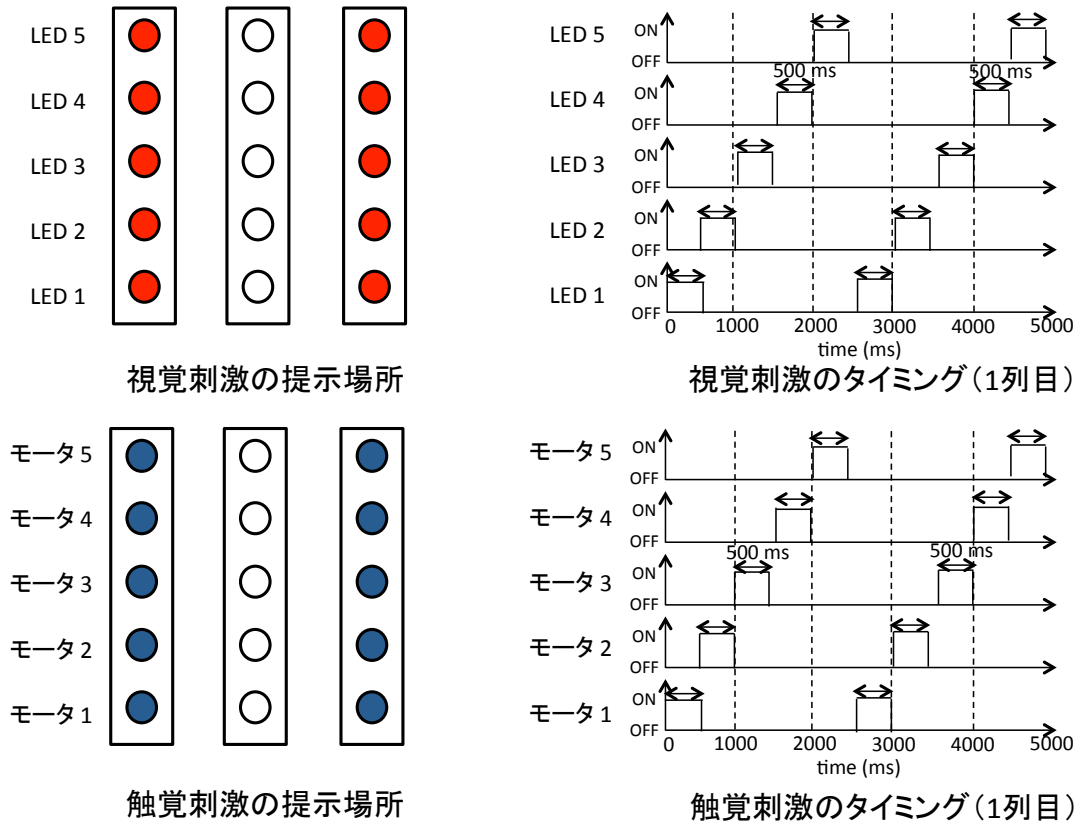


図 4.8 刺激パターン (2回目)

センセーションを感じやすくかつ安定してモータが振動する時間だからである。5行目まで刺激を提示した後は再び1行目から繰り返す、3回繰り返したものを1回の試行とした。

本実験において、1列目および3列目の振動モータを振動させたときに2列目が震えていると感じた場合はファントムセンセーションが生起されたことを意味し、1列目と3列目が震えていると感じた場合はファントムセンセーションが生起されなかったことを意味する。本研究の仮説では、2列目のLEDを点灯させた場合はファントムセンセーションが生起されやすく、1列目と3列目のLEDを点灯させた場合はファントムセンセーションが生起されにくいと予想した。

実験結果

1回目から3回目までの試行において、震えていると回答した位置を以下の3種類に分類した。

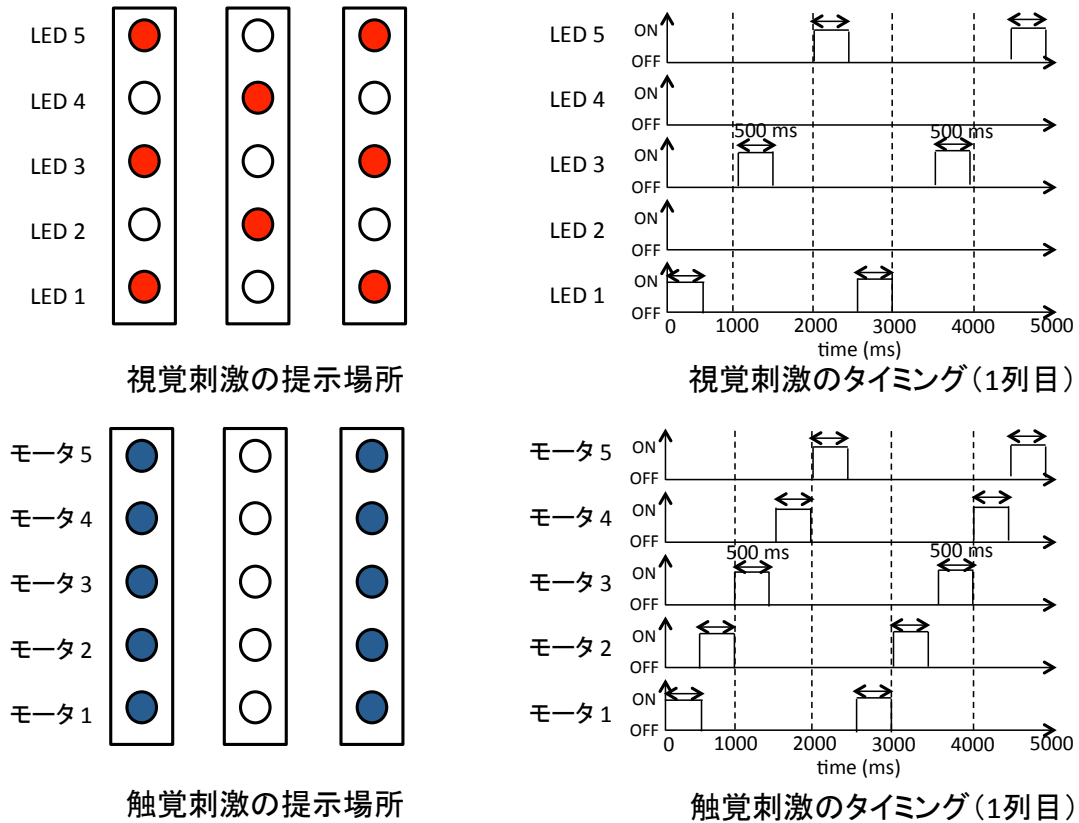


図 4.9 刺激パターン (3 回目)

1. 2 列目のみを回答
2. 1, 3 列目の両方を回答
3. その他

1 の回答はファントムセンセーションが生起されたことを表し、2 の回答はファントムセンセーションが生起されなかったことを表す。各行ごとに回答の割合を示したものを図 4.10 から図 4.12 に示す。回答割合は、それぞれの回答数を全被験者数の 35 で割ることにより求めた。また、各試行におけるファントムセンセーションの生起確率 (2 列目が震えていると回答した割合) を図 4.13 に示す。

図 4.10 より、1 回目の試行においては、2 列目の LED を点灯させることにより、各行において 2 列目が震えていると回答した割合が最も高かった。 χ^2 検定を行い回答割合の有意差を確認したところ、 $\chi^2(8) = 217, p < .01$ となり、有意差が認められた。残差分析を行っ

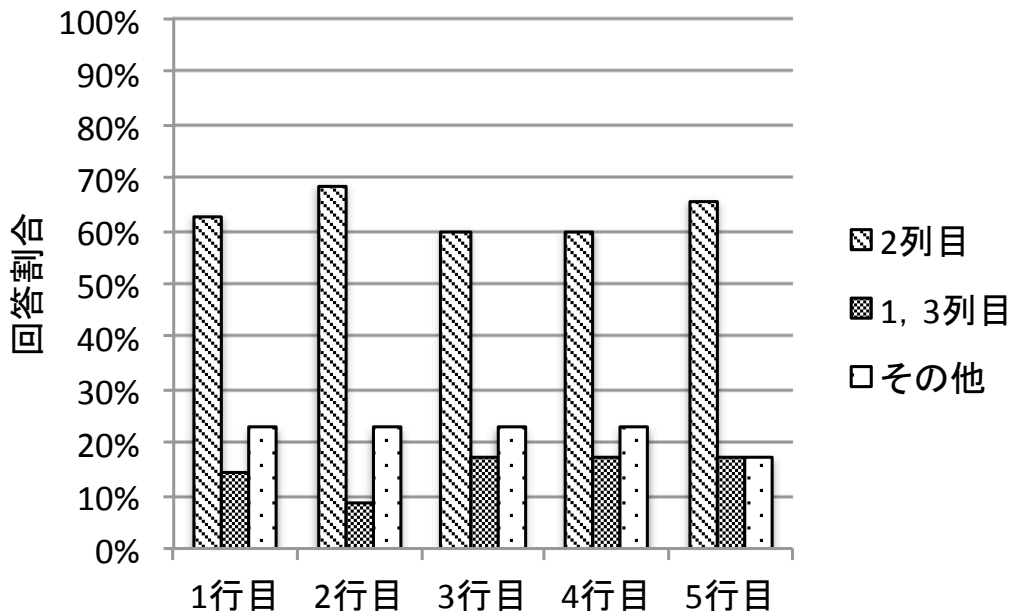


図 4.10 1 回目の回答結果

たところ、各行における2列目の回答割合が有意水準1%で有意に高かった。図 4.11 より、2 回目の試行においては、1, 3 列目の LED を点灯させることにより、各行において1, 3 列目が震えていると回答した割合が最も高かった。 χ^2 検定を行い回答割合の有意差を確認したところ、 $\chi^2(8) = 418, p < .01$ となり、有意差が認められた。残差分析を行ったところ、各行における1, 3 列目の回答割合が有意水準1%で有意に高かった。図 4.12 より、3 回目の試行においては、1, 3 列目と2列目の LED を交互に点灯させることにより、1, 3, 5 行目では1, 3 列目が震えていると回答した割合が最も高く、2, 4 行目では2列目が震えていると回答した割合が最も高かった。 χ^2 検定を行い回答割合の有意差を確認したところ、 $\chi^2(8) = 432, p < .01$ となり、有意差が認められた。残差分析を行ったところ、1, 3, 5 行目における1, 3 列目と、2, 4 行目における2列目の回答割合が有意水準1%で有意に高かった。これらの実験結果より、2列目の LED を点灯させた場合はファントムセンセーションの生起が促進され、1, 3 列目の LED を点灯させた場合はファントムセンセーションの生起が抑制される傾向があると言える。

また、図 4.10 と図 4.11 の結果において、行によって回答傾向が異なるかを検証するために、各行間の回答割合の有意差を χ^2 検定により確認したところ、図 4.10 の結果では $\chi^2(8) = 2.04, p = 0.98$ となり、図 4.11 の結果では $\chi^2(8) = 3.01, p = 0.93$ となったことよ

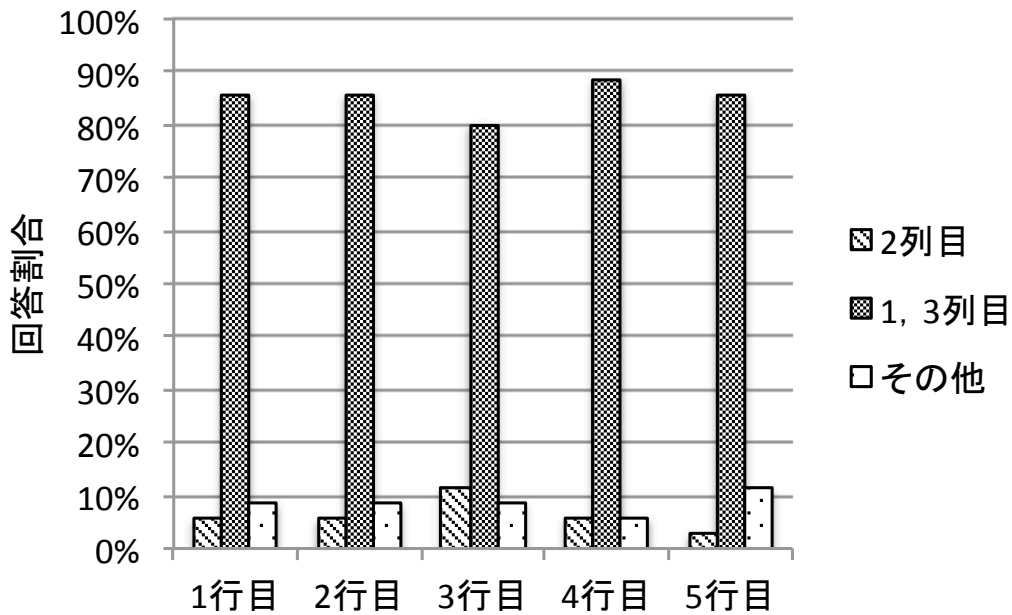


図 4.11 2 回目の回答結果

り、各行間の回答割合に有意差は認められなかった。したがって、1行目から5行目までの各行において触覚提示位置の感じ方に有意差はないと言える。

次に、図 4.13 より、1回目と3回目の試行における2行目と4行目のファントムセンセーションの生起確率を比較したところ、視覚刺激と触覚刺激の刺激パターンが同じにも関わらず、3回目の方がファントムセンセーションの生起確率が10 - 20 %程度高かった。1回目と3回目の2, 4行目におけるファントムセンセーションの生起確率について有意差があるかを検証するために χ^2 検定を行ったところ、2行目においては $\chi^2(1) = 1.20, p = 0.27$ となり有意差は認められなかったが、4行目においては $\chi^2(1) = 5.85, p < .05$ となり有意水準5 %で有意差が認められた。これらの実験結果より、各行におけるファントムセンセーションの生起確率は、そのときの視覚刺激および触覚刺激の刺激パターンのみによって決まるのではなく、前後の行における視覚刺激と触覚刺激の刺激パターンにも影響される可能性が考えられる。

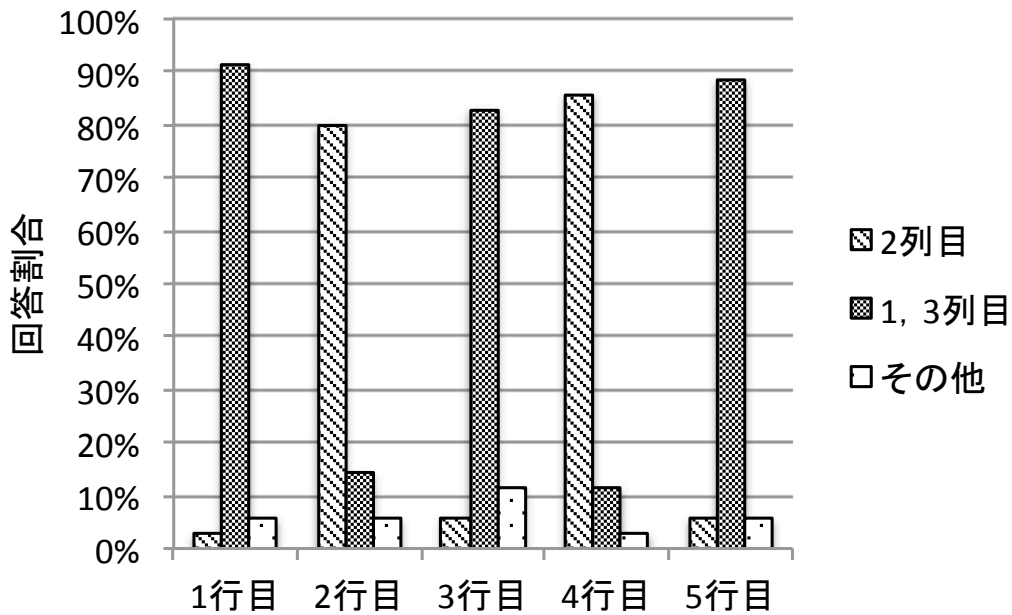


図 4.12 3回目の回答結果

考察

全ての試行において、振動させるモータの位置は同じだったが、点灯させるLEDの位置を変化させることで、震えていると回答した位置は大きく異なり、視覚刺激の提示位置を回答する傾向にあった。したがって、同じパターンの触覚刺激を提示しても、視覚刺激の提示パターンを変化させることで、触覚提示位置の感じ方あるいは判断を変化させることが可能であると言える。この結果は、視覚と触覚のクロスモーダル知覚に関する先行研究の知見と一致するものであった。そして、本実験結果より、ファントムセンセーションの提示においても視覚刺激の影響があらわれ、その生起確率が変化することが明らかとなった。

また、ファントムセンセーションの生起確率は、ある時点の視覚刺激と触覚刺激の影響だけではなく、それらの刺激の前後の刺激も影響している可能性が示唆された。このような現象が起こる理由については、筆者らの仮説では、「視覚刺激と触覚刺激が同じ位置に提示されている」と被験者に思いこませることが重要であると考えている。1回目と2回目の試行の実験結果を比較すると、1回目のファントムセンセーションが生起される割合（2列目を回答した割合）よりも2回目のファントムセンセーションが生起されなかった割合（1, 3列目を回答した割合）の方が回答割合が偏る傾向が見られたことより、両端のLED

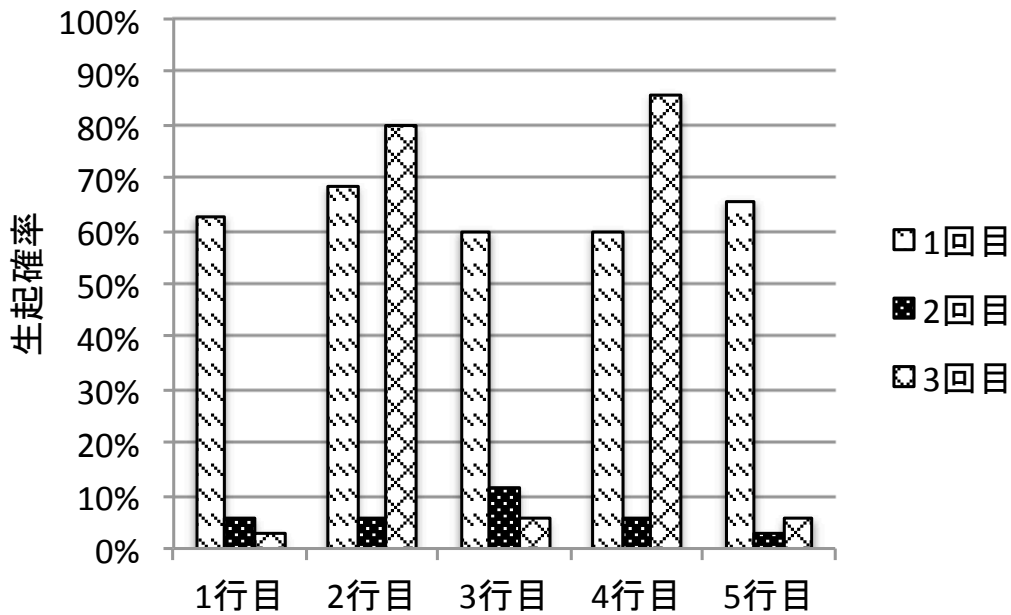


図 4.13 ファントムセンセーションの生起確率

を点灯させることで視覚刺激と触覚刺激が同じ位置に提示されていると判断しやすいと考えられる。3回目の試行においては、1, 3, 5行目において両端のLEDを点灯させたことで視覚刺激と触覚刺激が一致していると被験者が思いこみ、2, 4列目においても同様に一致していると判断しやすくなったのではないかと考えている。

ただし、本実験結果から得られる知見は限定的な実験環境下での知見であり、汎用的なファントムセンセーションの制御には至っていない。本実験は、刺激部位、刺激パターン、刺激順序などを限定した実験条件となっているため、本実験結果から得られた知見を汎用的に利用するためには、これらの実験条件を変化させても同様の効果が得られることを確かめる必要がある。

4.3.3 実験2：視覚刺激とファントムセンセーションの生起の関係性を詳細に検討するための追実験

刺激パターンをさらに増やし、刺激順序をランダムとした場合でも、触覚提示位置の感じ方や判断に関して同様の傾向が得られるか検証した実験について述べる。本実験の参加者は、20代から30代の男性6名であった。いずれの被験者も実験1には参加していない。

本実験では、多様な刺激パターンに対しても実験1と同様に視覚刺激の影響によりファントムセンセーションの生起確率が変化するかについて検証した。また、全5行のうち、ファントムセンセーションを生起しやすい視覚刺激（2列目のLEDを点灯させる）の割合を変化させることで、ファントムセンセーションの生起確率がどのように変化するかを検証した。実験1の結果より、ファントムセンセーションの生起確率は、現在の刺激だけでなく前後の刺激の影響を受ける可能性が示唆されたことから、ファントムセンセーションを生起しやすい視覚刺激の割合を変化させることでファントムセンセーションの生起確率が変化するのではないかと考えた。

実験方法

実験1と同様の視触覚ディスプレイを用い、1列目と3列目の振動モータを振動させたときに同時に提示する視覚刺激の提示パターンを変化させた。視覚刺激の提示パターンは以下のように定めた。

1. 全5行中、1, 3列目を点灯させた行数が4行で2列目を点灯させた行数が1行：5通り
2. 全5行中、1, 3列目を点灯させた行数が3行で2列目を点灯させた行数が2行：10通り
3. 全5行中、1, 3列目を点灯させた行数が2行で2列目を点灯させた行数が3行：10通り
4. 全5行中、1, 3列目を点灯させた行数が1行で2列目を点灯させた行数が4行：5通り
5. 全5行中、1, 3列目を点灯させた行数が0行で2列目を点灯させた行数が5行：1通り

被験者は各行において震えていると感じた触知覚位置を実験1と同様の回答用紙に記入した。各刺激パターンで2列目を点灯させた行において2列目のみが振動したと回答した場合はファントムセンセーションが生起されたと見なし、その割合（ファントムセンセーションの生起確率）を測定した。本実験においては、モータの振動音が十分に聞こえる騒音環境下での実験だったため、振動音による触知覚への影響を除去するために、実験中は被験者にホワイトノイズを聞かせた。また、被験者が実験の意図を予測することを防ぐために、

上記の31通りの刺激パターンに加え、ダミーの刺激パターンを17通り提示し、全部で48通りの刺激パターンについて触知覚位置を回答させた。順序効果の影響を除去するために刺激提示パターンの順序はランダムとした。ダミー刺激は、以下のとおりである。

1. 視覚刺激が1列目か2列目か3列目，
触覚刺激が1列目か3列目：6通り
2. 視覚刺激が1, 2列目か1, 3列目か2, 3列目，
触覚刺激が1列目か3列目：6通り
3. 視覚刺激が1列目か3列目，
触覚刺激が1, 3列目：2通り
4. 視覚刺激が1, 2列目か1, 3列目か2, 3列目，
触覚刺激が1, 3列目：3通り

実験結果

図4.14に、各刺激パターンにおけるファントムセンセーションの生起確率（2列目のLEDを点灯させた行において2列目のみが震えていると回答した割合）と False Alarm Rate（1, 3列目のLEDを点灯させた行において2列目のみが震えていると回答した割合）を示す。図4.14より、どの刺激パターンにおいてもファントムセンセーションの生起確率が60 - 80%となっており、実験1と同様の傾向が得られた。一方で、全5行中2列目のLEDを点灯させた行数の違いによりファントムセンセーションの生起確率に有意差があらわれるかを検証するために χ^2 検定を行ったところ、 $\chi^2(4) = 17.9, p < .01$ となり、有意差が認められた。残差分析を行ったところ、5行とも2列目を点灯させた場合のファントムセンセーションの生起確率が有意水準1%で有意に低かった。また、前後のLEDの点灯位置によってファントムセンセーションの生起確率に有意な差が生じるかを以下の手順で検証した。全5行中2列目を点灯させた行数が3行の場合の刺激パターンのうち、前後の行の点灯位置が2列目だった場合のファントムセンセーションの生起確率と、前後の行の点灯位置が1, 3列目だった場合のファントムセンセーションの生起確率を比較したところ、それぞれ78%と67%となった。 χ^2 検定を行い有意差を確認したところ、 $\chi^2(1) = 0.55, p = 0.46$ となり、有意差が認められなかった。

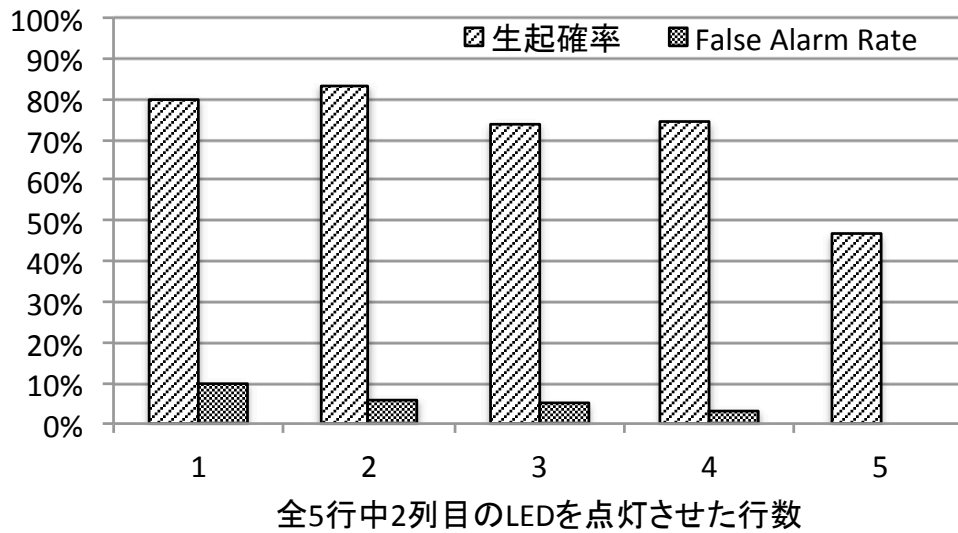


図 4.14 ファントムセンセーションの生起確率と False Alarm Rate

考察

本実験結果より、刺激のパターンを多様化し、刺激提示順序をランダムとしても、実験1の結果と同様に、視覚刺激の提示パターンにより、ファントムセンセーションの生起を制御できる可能性が示唆された。また、全5行中2列目のLEDを点灯させた行数が5行であった場合のファントムセンセーションの生起確率は、他の刺激パターンでの生起確率に比べて低かったことから、ファントムセンセーションの生起確率は、ある時点の視覚刺激と触覚刺激の影響だけではなく、それらの刺激の前後の刺激や刺激変化に対する認知も影響している可能性が示唆された。

本実験では1行目から5行目にかけて時間差なく刺激を順次提示したことから、仮現運動が生じていた可能性が十分に考えられる。仮現運動の有無が被験者のファントムセンセーションの生起確率に影響を及ぼすかについて、実験2に参加した被験者3名に対し、追加実験を行った。実験1の刺激パターン2種類(図4.7と図4.8)について、各刺激提示間に刺激を提示しない時間を0秒(仮現運動あり)と1秒(仮現運動なし)に設定し、仮現運動の有無によりファントムセンセーションの生起確率に違いがあらわれるかを検証したところ、被験者3名においては、仮現運動の有無によるファントムセンセーションの生起確率の違いは見られなかった。本実験は被験者数が少なかったことから、被験者数を増やして再検証を行う予定である。

4.4 複数の視覚刺激提示が触知覚位置の定位に与える影響に関する検証実験

視覚刺激と触覚刺激の提示位置や刺激点数が異なる場合における触知覚位置の定位傾向について検証した。例えば、図 4.3 において、1 行 1 列目の振動モータが震えている状態で 1 行 3 列目の LED が点灯している場合における触知覚位置や、3 行 1 列目の振動モータが震えている状態で 3 行 2 列目と 3 行 3 列目の LED が点灯している場合における触知覚位置や触知覚点数を測定した。被験者は、20 代から 30 代の 15 名（男性：14 名，女性：1 名）であった。

4.4.1 実験方法

本実験では、肘（1 行目）から手首（5 行目）の方向へ刺激を 1 行ずつ順に提示した。3 列の刺激提示のタイミングは同期しており、刺激提示時間は 500 ms とした。5 行目まで刺激を提示した後は再び 1 行目から繰り返す。10 回繰り返したものを 1 回の試行とした。被験者は、刺激提示中または提示後に、各行ごとに震えていると感じる列を回答し、その回答位置を触知覚位置とした。回答方法は、回答用紙を用いて振動を感じた位置をチェックするものとした。また、1 行につき複数の列を回答することも可能とし、被験者が複数の列で振動を感じた場合には、その全ての列を回答させた。

実験手順は以下の通りである。まず、被験者の前腕内側に視触覚ディスプレイを巻きつけた。このとき、触知覚位置を回答する際にバイアスがかからないようにするために、振動モータの配置については被験者に見せず、また口頭でも伝えていない。次に、デモンストレーションとして視覚刺激と触覚刺激を提示し、回答方法を説明した。ただし、被験者に視覚刺激と触覚刺激の関係は説明しなかった。被験者が回答方法を理解した後、本実験を行う。被験者が自身の前腕を見ている状態で刺激提示を行い、刺激提示後に被験者は震えていると知覚した場所を回答用紙に記入した。また、振動音による触知覚への影響を除去するために、実験中は被験者にヘッドホン装着させてホワイトノイズを聞かせた。

視覚刺激と触覚刺激の提示パターンは、被験者の実験中の疲労が出ない範囲で網羅性になるべく高めるように、全 48 種類の刺激パターンを設定した。表 4.1、表 4.2 に刺激パターンを示す。表 4.1 で示した刺激パターンでは、視覚刺激および触覚刺激は 5 行全て同じ刺激パターンで提示した。例えば、視覚刺激提示位置が 1 列目、触覚刺激提示列が 1&3 列目である刺激パターン 3 では、1 行目から 5 行目まで全て視覚刺激は 1 列目、触覚刺激は 1&3 列目に提示した。表 4.2 で示した刺激パターンでは、触覚刺激を 1&3 列目で固定し、視覚

刺激を2列目または1&3列目に提示し、その割合を変化させた。例えば、視覚刺激の提示パターンとして、2列目が2行、1&3列目が3行であった場合、1行目から5行目のうちいずれか2行は2列目に視覚刺激を提示し、残りの3行では1&3列目に視覚刺激を提示した。図4.15に上記条件下での刺激パターンの一例を示す。図の左側で色がついている位置がLEDおよびモータが駆動する位置となっており、図の右側のグラフはLEDおよびモータの1列目のON/OFFのパターンを示している。提示パターンは組み合わせの数だけ存在するため、各刺激パターンはそれぞれ5通り、または10通り存在する。

各刺激パターンの設定理由を以下に示す。

1. 視覚と触覚の刺激点数が異なる場合の検証。
 - (a) 視覚刺激1点, 触覚刺激2点 (ID: 3, 6, 9) .
 - (b) 視覚刺激2点, 触覚刺激1点 (ID: 10, 11, 13, 14, 16, 17) .
2. 視覚と触覚の刺激点数が同じだが位置が異なる場合の検証。
 - (a) 視覚刺激1点, 触覚刺激1点 (ID: 2, 4, 5, 7) .
 - (b) 視覚刺激2点, 触覚刺激2点 (ID: 12, 18) .
3. 視覚と触覚の刺激位置が同じ場合の検証。
 - (a) 視覚刺激1点, 触覚刺激1点 (ID: 1, 8) .
 - (b) 視覚刺激2点, 触覚刺激2点 (ID: 15) .
4. 各行間で視覚刺激点の個数が変化する場合の検証 (ID: 19 - 48) .

なお、刺激の提示順序の影響を排除するために、刺激提示順序はランダムとした。

4.4.2 解析手法

表4.1の全18パターンの刺激を以下のように分類する。

- (i) 触覚刺激が1列目の場合 (ID: 1, 4, 7, 10, 13, 16) .
- (ii) 触覚刺激が3列目の場合 (ID: 2, 5, 8, 11, 14, 17) .
- (iii) 触覚刺激が1&3列目の場合 (ID: 3, 6, 9, 12, 15, 18) .

表 4.1 視覚と触覚の刺激パターン（表中の数字は刺激パターン ID）

		触覚刺激提示位置		
		1 列目	3 列目	1&3 列目
視覚刺激提示位置	1 列目	1	2	3
	2 列目	4	5	6
	3 列目	7	8	9
	1&2 列目	10	11	12
	1&3 列目	13	14	15
	2&3 列目	16	17	18

表 4.2 刺激点数変化時の視覚刺激パターン（触覚刺激は 1 & 3 列目）

視覚刺激	刺激パターン ID
2 列目が 4 行, 1&3 列目が 1 行	19 - 23
2 列目が 3 行, 1&3 列目が 2 行	24 - 33
2 列目が 2 行, 1&3 列目が 3 行	34 - 43
2 列目が 1 行, 1&3 列目が 4 行	44 - 48

各分類において、視覚刺激の提示位置や個数によってどのように触覚が定位するかを測定する。触覚定位の解析では、各列（1 列目, 2 列目, 3 列目）の触覚定位の割合 $P_c (c = 1, 2, 3)$ および各行での触覚点数（1 個, 2 個, 3 個）の割合 $P_r (r = 1, 2, 3)$ を求める。 P_c は刺激の提示回数を n , 各列において震えていると回答された回数を k とおくと, $P_c = k/n$ によって算出される。 P_r は刺激の提示回数を n , 各行において r 個震えていると回答された回数を m とおくと, $P_r = m/n$ によって算出される。本解析により、同一の触覚刺激に対して異なる視覚刺激を提示した場合における各列の触覚定位の差や触覚点数の差を検証する。

また、各行間で視覚刺激点数が変化する表 4.2 の全 30 パターンを用いて、全 5 行中の 2 列目点灯行数が変化した場合の触覚定位の変化を検証した。視覚刺激が 2 列目点灯時の触覚定位割合と視覚刺激が 1&3 列目点灯時の触覚定位割合についてそれぞれ解析を行った。

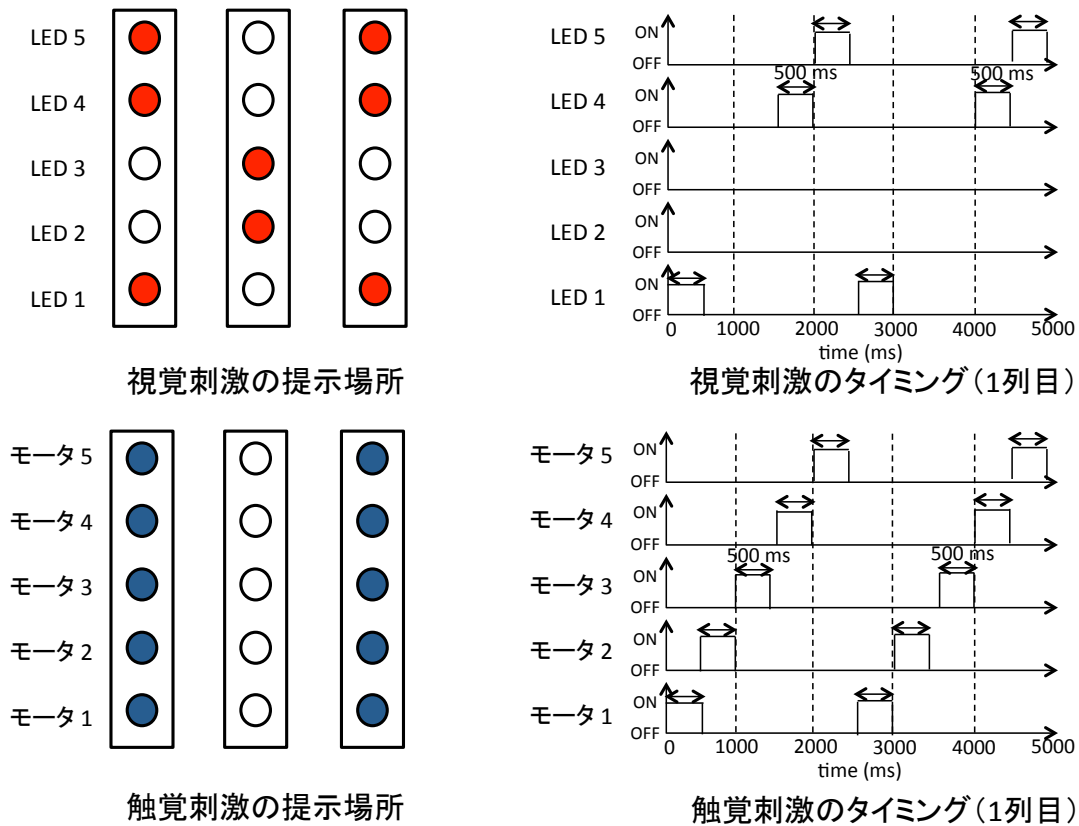


図 4.15 刺激提示パターン例

4.4.3 実験結果

触覚刺激が1列目の場合における触覚覚定位

視覚刺激が1個の場合 (ID: 1, 4, 7) における触覚覚定位割合 P_c の平均値および標準偏差 (エラーバーで表示) を図 4.16 に示す. 各場合において, 触覚刺激は同一 (1列目) だが, 視覚刺激提示位置における触覚覚定位割合が増加する傾向にあった. また, 視覚刺激が2個の場合 (ID: 10, 13, 16) における触覚覚定位割合 P_c の平均値および標準偏差を図 4.17 に示す. 図 4.16 の場合と同様に, 視覚刺激提示位置における触覚覚定位割合が高くなる傾向にあった. 回答傾向に違いがあるかを検証するために, それぞれの回答数をもとに χ^2 検定を行ったところ, $\chi^2(10) = 199, p < .01$ となり, 有意差が認められた. さらに, 残差分析を行った結果を表 4.3 に示す. 表中の + は有意に高い傾向を示し, - は有意に低い傾向を示す. 表 4.3 より, 視覚刺激を提示した列における触覚覚定位割合が有意に増加し, 視覚刺激を提示していない列における触覚覚定位割合が有意に減少する傾向にあった.

触覚刺激が3列目の場合における触知覚定位

視覚刺激が1個の場合 (ID: 2, 5, 8) における触知覚定位割合 P_c の結果を図 4.18 に、視覚刺激が2個の場合 (ID: 11, 14, 17) における触知覚定位割合 P_c の結果を図 4.19 に示す。回答傾向に違いがあるかを検証するために、それぞれの回答数をもとに χ^2 検定を行ったところ、 $\chi^2(10) = 262, p < .01$ となり、有意差が認められた。さらに、残差分析を行った結果を表 4.4 に示す。表 4.3 と同様に、視覚刺激を提示した列における触知覚定位割合が有意に増加し、視覚刺激を提示していない列における触知覚定位割合が有意に減少する傾向にあった。また、図 4.16, 図 4.17 と図 4.18, 図 4.19 を比較すると、触覚刺激が1列目の場合に比べて触覚刺激が3列目の場合は、視覚刺激の提示位置に触知覚定位する割合が高いという傾向が見られた。

触覚刺激が1&3列目の場合における触知覚定位

視覚刺激が1個の場合 (ID: 3, 6, 9) における触知覚定位割合 P_c の結果を図 4.20 に、視覚刺激が2個の場合 (ID: 12, 15, 18) における触知覚定位割合 P_c の結果を図 4.21 に示す。回答傾向に違いがあるかを検証するために、それぞれの回答数をもとに χ^2 検定を行ったところ、 $\chi^2(10) = 137, p < .01$ となり、有意差が認められた。さらに、残差分析を行った結果を表 4.5 に示す。触覚刺激点数が複数であっても、表 4.3 や表 4.4 と同様に、視覚刺激を提示した列における触知覚定位割合が有意に増加し、視覚刺激を提示していない列における触知覚定位割合が有意に減少する傾向にあった。

各行間で視覚刺激点数が変化した場合における触知覚定位

視覚刺激2列目点灯時 (触覚刺激: 1&3列目) における触知覚定位割合 P_c の結果を図 4.22 に、視覚刺激1&3列目点灯時 (触覚刺激: 1&3列目) における触知覚定位割合 P_c の結果を図 4.23 に示す。回答傾向に違いがあるかを検証するために、それぞれの回答数をもとに χ^2 検定を行ったところ、視覚刺激2列目点灯時は、 $\chi^2(8) = 24.2, p < .01$ となり、有意差が認められた。さらに、残差分析を行った結果を表 4.6 に示す。残差分析の結果から、視覚刺激と触覚刺激の提示パターンが同じ場合 (視覚刺激: 2列目, 触覚刺激: 1&3列目) でも、全体の刺激パターンが異なることによって触知覚定位が変化する傾向が示された。一方、視覚刺激1&3列目点灯時は、 $\chi^2(8) = 2.31, p = 0.97$ となり、有意差は認められなかった。

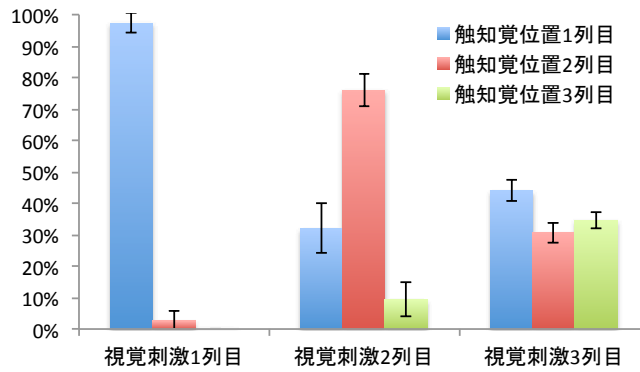


図 4.16 触覚定位割合（触覚刺激：1 列目，視覚刺激点数：1 個）

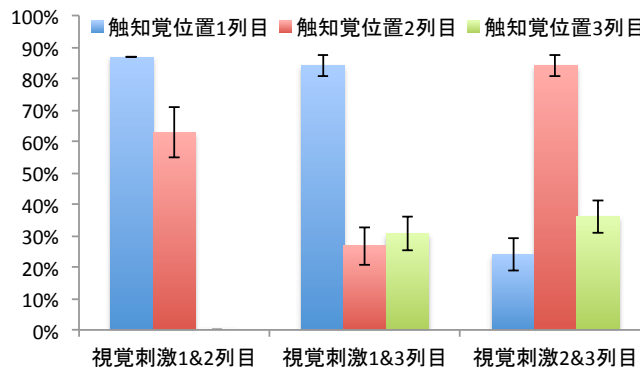


図 4.17 触覚定位割合（触覚刺激：1 列目，視覚刺激点数：2 個）

表 4.3 残差分析結果 1

		触覚位置		
		1 列目	2 列目	3 列目
視覚刺激提示位置	1 列目	+**	-**	-**
	2 列目	-**	+**	n.s.
	3 列目	n.s.	n.s.	+**
	1&2 列目	+*	n.s.	-**
	1&3 列目	+*	-**	+*
	2&3 列目	-**	+**	+**

*: $p < .05$, **: $p < .01$, n.s.: not significant

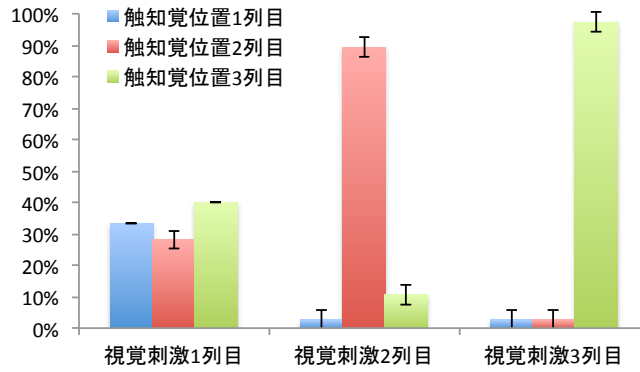


図 4.18 触覚定位割合（触覚刺激：3列目，視覚刺激点数：1個）

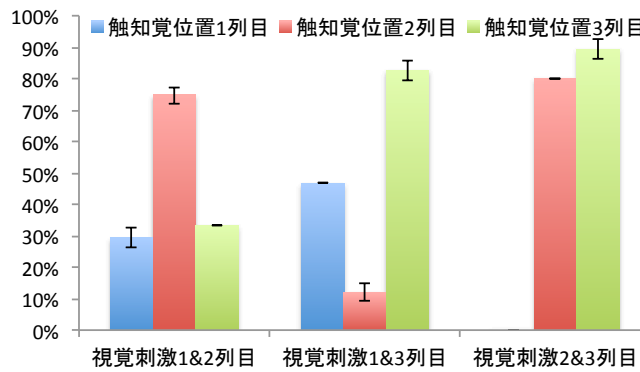


図 4.19 触覚定位割合（触覚刺激：3列目，視覚刺激点数：2個）

表 4.4 残差分析結果 2

		触覚位置		
		1列目	2列目	3列目
視覚刺激提示位置	1列目	+**	-*	n.s.
	2列目	-**	+**	-**
	3列目	-**	-**	+**
	1&2列目	n.s.	+**	-**
	1&3列目	+**	-**	+**
	2&3列目	-**	+*	n.s.

*: $p < .05$, **: $p < .01$, n.s.: not significant

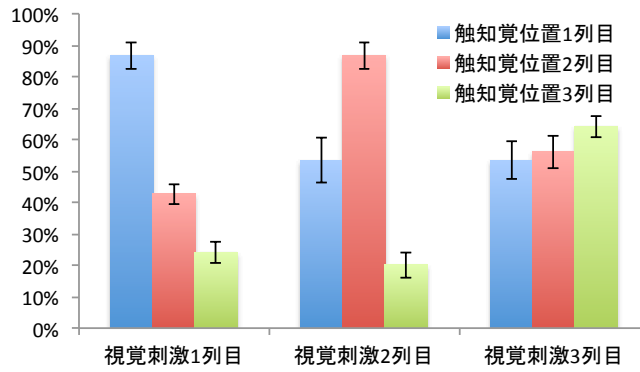


図 4.20 触覚定位割合（触覚刺激：1&3 列目，視覚刺激点数：1 個）

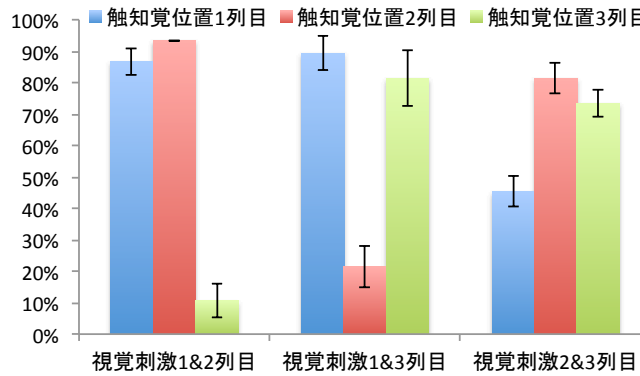


図 4.21 触覚定位割合（触覚刺激：1&3 列目，視覚刺激点数：2 個）

表 4.5 残差分析結果 3

		触覚位置		
		1 列目	2 列目	3 列目
視覚刺激提示位置	1 列目	+**	n.s.	-**
	2 列目	n.s.	+**	-**
	3 列目	-*	n.s.	+**
	1&2 列目	n.s.	+**	-**
	1&3 列目	+*	-**	+**
	2&3 列目	-**	n.s.	+**

*: $p < .05$, **: $p < .01$, n.s.: not significant

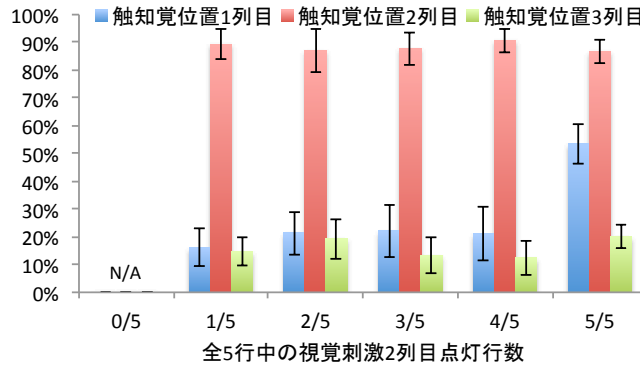


図 4.22 視覚刺激 2 列目点灯時の触知覚定位割合

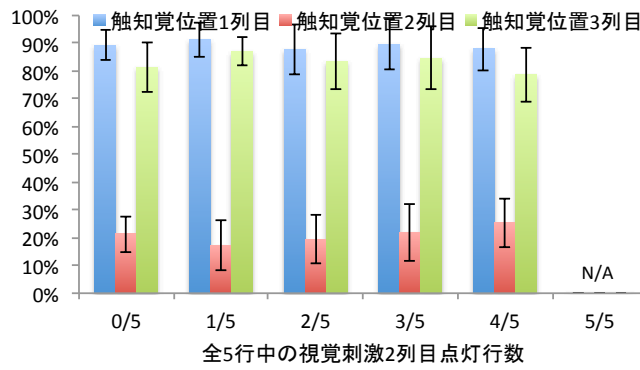


図 4.23 視覚刺激 1&3 列目点灯時の触知覚定位割合

表 4.6 残差分析結果 4

		触知覚位置		
		1 列目	2 列目	3 列目
2 列 目 点 灯 行 数	0/5	N/A	N/A	N/A
	1/5	n.s.	n.s.	n.s.
	2/5	n.s.	n.s.	+*
	3/5	n.s.	n.s.	n.s.
	4/5	n.s.	n.s.	n.s.
	5/5	+**	-**	n.s.

*: $p < .05$, **: $p < .01$, n.s.: not significant

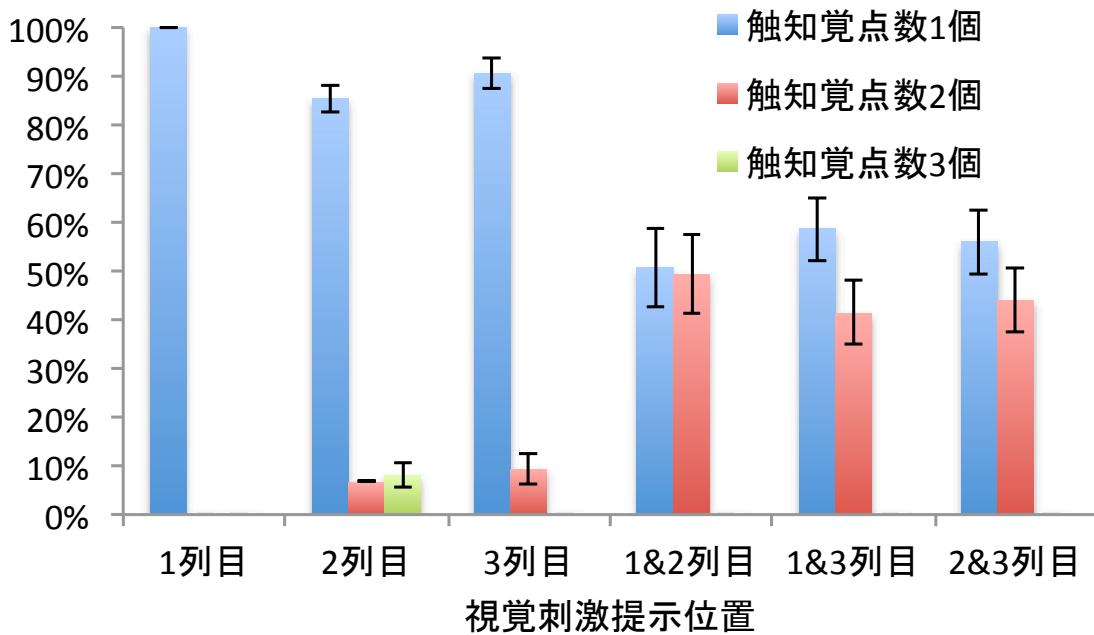


図 4.24 触知覚点数割合 (触覚刺激：1 列目)

視覚刺激点数の違いが触知覚点数に与える影響

触覚刺激が 1 列目の場合における触知覚点数割合 P_r を図 4.24 に、触覚刺激が 3 列目の場合における触知覚点数割合 P_r を図 4.25 に示す。図より、1 列のみが振動している状態で複数の列に視覚刺激を提示した場合は、触知覚点数が複数であると回答する割合が増加する傾向が見られた。それぞれの回答数をもとに χ^2 検定を行ったところ、触覚刺激が 1 列目の場合は $\chi^2(10) = 125, p < .01$ となり、触覚刺激が 3 列目の場合は $\chi^2(5) = 154, p < .01$ となり、ともに有意差が認められた。残差分析を行ったところ、視覚刺激が 1 点の場合は触知覚が 1 点の割合が有意に増加し、視覚刺激が 2 点の場合は触知覚が 2 点の割合が有意に増加する傾向があった。

触覚刺激が 1&3 列目の場合における触知覚点数割合 P_r を図 4.26 に示す。視覚刺激が 1 個の場合は触知覚点数が 1 個の割合が増加し、視覚刺激が 2 個の場合は触知覚点数が 2 個の割合が増加した。それぞれの回答数をもとに χ^2 検定を行ったところ、 $\chi^2(10) = 92.6, p < .01$ となり、有意差が認められた。残差分析を行ったところ、視覚刺激が 1 点の場合は触知覚が 1 点の割合が有意に増加し、視覚刺激が 2 点の場合は触知覚が 2 点の割合が有意に増加する傾向があった。また、視覚刺激が 2&3 列目の場合は、触知覚点数が 3 個の割合が有意

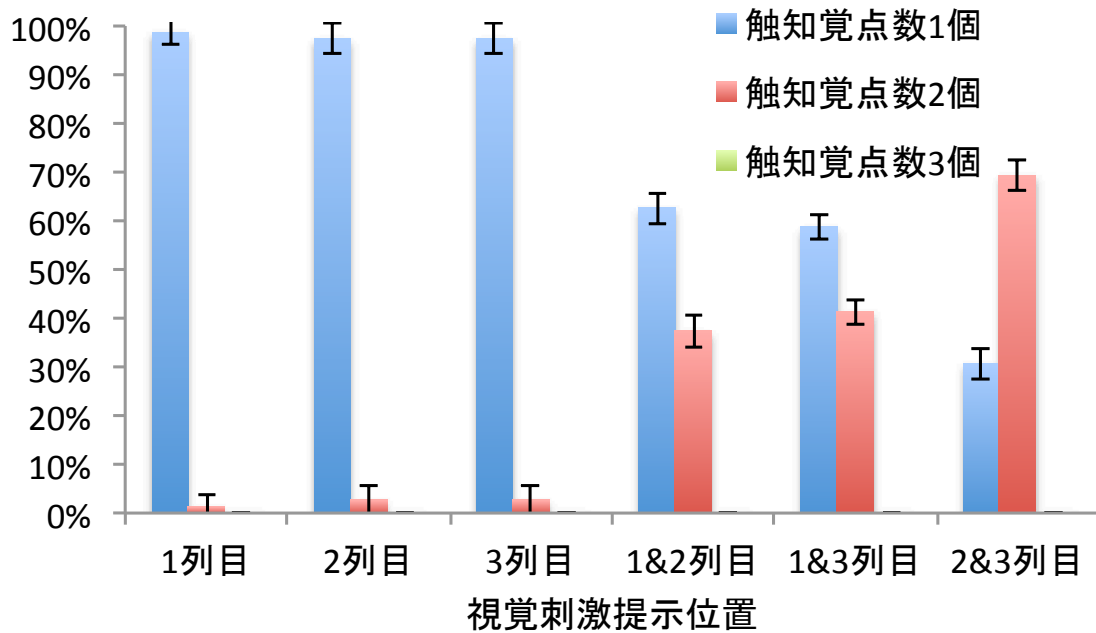


図 4.25 触知覚点数割合 (触覚刺激: 3 列目)

に増加した。したがって、触覚刺激点数が1個の場合と同様に、触覚刺激点数が2個の場合も、触知覚点数は視覚刺激点数によって変化すると言える。

4.4.4 考察

触知覚定位に関する実験結果より、視覚刺激を提示している列は触知覚定位割合が増加する傾向があり、視覚刺激を提示していない列は触知覚定位割合が減少する傾向にあると言える。これらは従来の研究結果 [104, 105, 106] とも整合性が取れており、刺激点が複数となってもその傾向は保たれるという新たな知見と言える。ただし、被験者ごとのばらつきが大きいため、クロスモーダル知覚の生起の仕方は被験者ごとに大きく異なると言える。また、一般的に触覚の空間分解能は高齢になるほど低下すると言われていることから、視触覚ディスプレイにおける触知覚の定位傾向は個人ごとに大きく異なると考えられる [103]。したがって、視触覚ディスプレイを用いて、全てのユーザに対して意図した位置に触知覚を定位させるためには、個人ごとにキャリブレーションを行う必要があると考えられる。

また、図 4.16, 図 4.17 と図 4.18, 図 4.19 を比較して、触覚刺激が3列目の場合の方が視覚刺激の提示位置に触知覚定位する傾向が見られたことについて、実験後に被験者に感

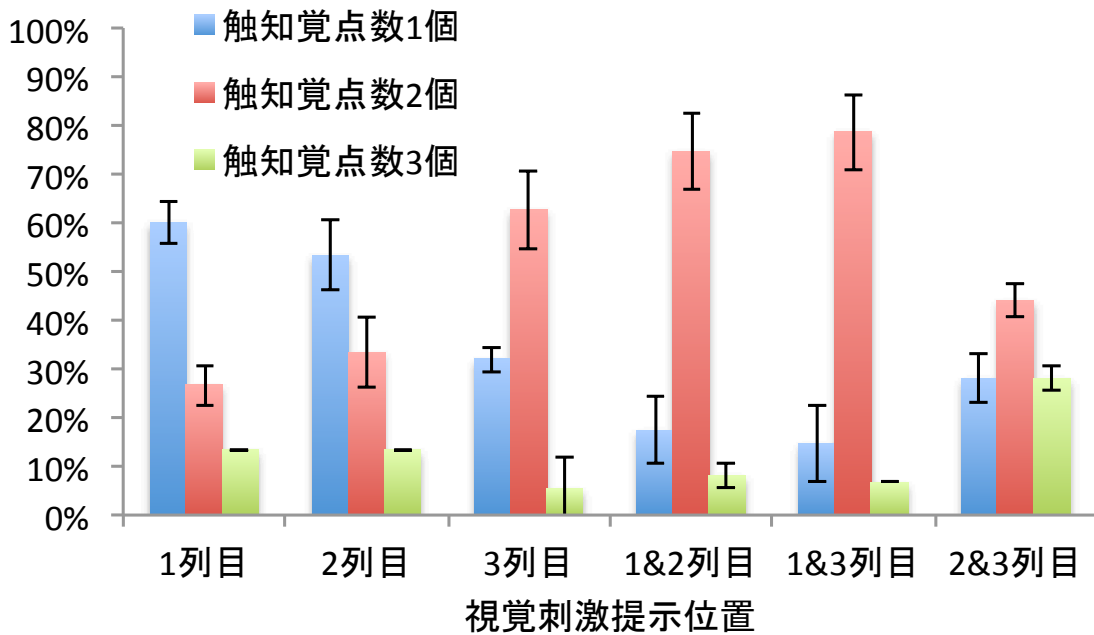


図 4.26 触覚点数割合（触覚刺激：1&3 列目）

想を聞いたところ、「1 列目よりも 3 列目の方が振動の知覚位置がはっきりせず、結果として視覚刺激に誘導されたように感じた」との意見が複数被験者から寄せられた。このような触覚の違いの原因としては、前腕部の筋肉や骨や神経の配置が影響していると考えている。今後、さらに原因を調査し、部位ごとに細分化したクロスモーダル知覚について検証を進めていく予定である。

触覚点数の変化に関する実験結果より、1 個の振動刺激に対して、2 個の視覚刺激を提示することにより、振動を感じる位置を 2 点にできる可能性が示唆された。一方で、2 個の振動刺激に対して、1 個の視覚刺激を提示することにより、振動を感じる位置を 1 点にできる可能性が示唆された。従来のファントムセンセーションのように触覚刺激の振動を制御するのではなく、視覚刺激を制御することによって触覚点数を変化させることができる可能性があるという知見は、視覚ディスプレイにおける触覚提示の制御を簡易に行うための知見として有用であると言える。また、各行間で視覚刺激点数を変化させた場合、触覚点数もその変化に追従する傾向が見られたことより、視覚刺激により触覚点数を動的に変化させることができると言える。

4.4.5 まとめと今後の課題

本章では複数の視覚刺激提示が触知覚位置の定位に与える影響について検証した。まず、ファントムセンセーションを視覚刺激により制御する手法に関する検討を行った。従来、振動モータを利用した触覚ディスプレイにおいて、ファントムセンセーションは広く用いられているが、視覚刺激がファントムセンセーションの生起に与える影響については十分に検討されていなかった。本研究では、ファントムセンセーションは視覚刺激の影響を受けると考え、ファントムセンセーションの生起は視覚刺激によって制御可能であるという仮説を立てた。視覚刺激と触覚刺激の刺激パターンを変化させながら刺激提示を行ったところ、触覚刺激の提示パターンが同じでも視覚刺激の提示パターンを変化させることでファントムセンセーションの生起確率が変化することが確認され、ファントムセンセーションの生起を視覚刺激の提示によって制御可能であることが示唆された。また、ファントムセンセーションの生起確率は、ある時点での視覚刺激と触覚刺激の影響だけでなく、その前後の刺激の影響も受ける可能性が示唆された。ただし、本論文で述べた知見は、刺激提示パターンを限定した実験環境下での知見であるため、判断・反応バイアスが介在している可能性があり、汎用的なファントムセンセーションの制御には至っていない。今後は、様々な実験環境下において、視覚刺激がファントムセンセーションの生起に与える影響について調査し、より汎用的なファントムセンセーションの生起の制御に関する検証を進めていく予定である。

次に、視覚刺激と触覚刺激の刺激点の個数が異なる場合について検証し、触知覚位置が視覚刺激の影響を受けて変化することや、視覚刺激の刺激点数を増減させることにより触知覚点数が増減されることなど、視触覚融合コンテンツの制作や視触覚ディスプレイの設計で有用となる実験結果を得られた。本実験結果より、視触覚ディスプレイの設計においては、視覚刺激と触覚刺激の提示位置関係に注目し、それぞれの刺激提示位置が十分に近い場合は、視覚刺激を制御することで触知覚位置を制御することが可能であると言える。ただし、本論文の知見は、前腕の一方のみにおける刺激提示に限った知見であるため、多様な視触覚コンテンツに対応するためには、刺激部位や刺激強度や刺激提示パターンのバリエーションをさらに増やして検証する必要がある。また、視触覚融合コンテンツに応用するためには、クロスモーダル知覚における個人差の吸収方法や聴覚刺激などの他感覚刺激からの影響などについても検討していかなければならない。今後の方針として、上記の課題を解決するための検証を行うとともに、本知見を応用して、前腕部に視覚刺激と触覚刺激を提示する視触覚融合コンテンツの制作を進めていく予定である。

第5章 実装

5.1 触覚ディスプレイの設計例

本章では、視触覚ディスプレイの設計例と、デモ体験者のフィードバックコメントについて述べる。本章で検証した触覚ディスプレイは以下のとおりである。

1. 前腕に振動モータを設置した触覚ディスプレイ
2. 手のひらに振動モータを設置した触覚ディスプレイ
3. 小型の筐体に振動モータを設置した触覚ディスプレイ

5.2 前腕に振動モータを設置した触覚ディスプレイ

5.2.1 振動モータのレイアウト

最初に振動モータのレイアウトについて議論する。前腕における視覚刺激と触覚刺激のクロスモダリティによる触覚位置の定位に関する検証実験の結果から、触覚提示位置と視覚刺激の提示位置の距離が20 mm以内ならば、視覚刺激の提示位置によって触覚位置を制御可能であると考えられる。したがって、振動モータの設置位置またはファントムセンセーションによる触覚提示位置を中心に、半径20 mm以内の範囲ならば視覚刺激の提示位置制御により触覚提示が可能であると言える。図5.1に振動モータの設置位置の例を示す。2個の振動モータを80 mm間隔で設置し、それぞれの振動モータのON/OFFによって触覚提示位置を3点設定し、視覚刺激を利用することで、それぞれの触覚提示位置の中心位置から半径約20 mm以内の範囲の触覚を提示可能となる。

5.2.2 アプリケーション

両腕に図5.1のレイアウトで振動モータを設置することで、テーブルトップ型視触覚ディスプレイとして利用することができる。例えば、図5.2に示すように、AR技術を利用して

バーチャルボールを複数提示し、そのボールがテーブルに置いた腕で跳ね返る感覚を触覚刺激で提示する。このとき、ボールが腕に接触する位置に応じて、3種類の触覚提示位置のいずれかを提示することで、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が20 mm以内となり、視覚的にボールが当たった位置が震えているように感じる。また、複数のボールが同時に接触した場合でも、接触したボールの個数によって触覚位置の個数が変化するため、複数の位置が震えているように感じる。

また、AR技術と組み合わせた他の例としては、図5.3に示すように複数のARキャラクタが前腕の上を動き回るときに、その位置に応じた触覚刺激を違和感なく提示することが可能である。ARキャラクタの視覚的な位置に応じてユーザの触覚位置の個数が変化するため、単純な振動モータのON/OFF制御のみで複雑な動きのパターンが表現できる。例えば、2個の振動モータが震えている状態において、2種類のキャラクタが離れた位置にいる場合はファントムセンセーションが生起されずに触覚位置が2点となり、2種類のキャラクタが同じ位置にいる場合はファントムセンセーションが生起されて触覚位置が1点となる。

2種類のアプリケーションについて、研究室内でデモ展示を行ったところ、体験者のフィードバックコメントとして、視覚刺激と触覚刺激の提示位置のずれや違和感はほとんど生じなかったという意見が多かった。したがって、視覚提示位置と触覚提示位置の距離に一定の制約を設けることで、意図した位置に触覚提示ができることが確認された。

5.3 手のひらに振動モータを設置した触覚ディスプレイ

本研究の知見が前腕以外の部位でも適用可能であることを確かめるために、手のひら上に40 mm 間隔に2個の振動モータを設置する触覚ディスプレイを開発した(図5.4)。手のひらの二点弁別閾は前腕に比べて短く、敏感であることが知られているが、20 - 30代の被験者6名(男性5名、女性1名)で予備実験を行ったところ、前腕と同様に、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が20 mm以内ならば視覚刺激の影響により触覚位置が転移することが確認された。そこで、図5.4に示すように、手のひらにAR技術でバーチャルキャラクタを表示させ、その位置に応じて触覚刺激を提示するアプリケーションを考える。バーチャルキャラクタは手のひらの上を40 mm四方の領域(2個の振動モータの線分外の領域)を自由に動き回ることができ、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が20 mm以内となるように左右の振動モータのON/OFFを切り替える。本アプリケーションは、日本バーチャルリアリティ学会のサイバースペースと仮想都市研究会主催のシンポジウム(2011年12月)

や IEEE Virtual Reality conference (2012年3月)においてデモ展示を行い、多数の参加者に体験してもらった。フィードバックコメントとしては、視覚刺激と触覚刺激が適合しており、バーチャルキャラクターが動いている様子が手のひらに違和感なく伝わるという意見が多かった。したがって、本研究で提案した視覚刺激による触覚位置制御手法は、前腕以外の部位にも適用できる可能性が示唆された。

ただし、手のひらは前腕に比べて形が歪で分解能が均一でないため、振動モータの設置場所と触覚位置を制御するための視覚提示位置の関係は前腕よりも複雑となる。例えば、視覚提示位置と触覚提示位置が横方向にずれている場合は視覚提示位置方向へ触覚位置が転移するが、縦方向にずれている場合は視覚提示位置と触覚提示位置の整合性が取りにくくなり視覚刺激の影響力が弱まることがデモ展示を通じて明らかとなった。

5.4 小型の筐体に振動モータを設置した触覚ディスプレイ

身体に直接設置するのではなく、スマートフォンなどを想定して小型の筐体に振動モータを設置した触覚ディスプレイも開発した。予備検討のため、視覚刺激に LED、触覚刺激に振動モータを利用して、視覚刺激はプリミティブな刺激とした(図 5.5)。LED は 3 行 3 列の 9 個とし、LED の直線運動や円運動に合わせて振動刺激が視覚刺激と同じ位置に提示されていると感じるかを検証した。学内でデモ展示を行い、数十人の参加者に体験してもらったが、視覚刺激と振動刺激の動きが合っていると感じる意見と合っていないと感じる意見に分かれた。図 5.3 や図 5.4 の触覚ディスプレイに比べて、意図した位置に触覚提示することが難しくなった理由として、筐体に設置した振動モータと手のひらの間に隙間が生じたことが挙げられる。この課題を解決するためには、文献 [91] のように筐体を手のひらにフィットさせるための工夫が必要である。

5.5 考察

5.5.1 提案手法の実現性について

本章では、3 章と 4 章の実験結果に基づいて、触覚ディスプレイとアプリケーションを実装した。前腕に振動モータを設置した触覚ディスプレイにおいては、バーチャル物体と前腕の接触位置に応じて 2 個の振動モータの振動パターンを切り替えることで、違和感のない触覚フィードバックを提示することに成功した。提案アプリケーションでは振動モータの細かい制御は行っておらず、単純な ON/OFF の 2 値制御のみで実現している。視覚

刺激と触覚刺激が同時に提示される環境においては、空間知覚は視覚が支配的になるため、単純な触覚フィードバックであっても十分に機能する。

ただし、実験結果からも示されたように、視覚刺激の提示位置と触覚刺激の提示位置が離れすぎると違和感が生じてしまい視覚の影響力が弱まるので、視覚を併用しても単体のアクチュエータで提示可能な範囲は限られる。本論文では、その範囲は半径 20 mm 程度と定めている。アクチュエータの種類や大きさ、設置部位によって触覚提示可能な範囲は変化すると思われる。例えば、触覚の空間分解能が高い部位に振動モータを設置し、視覚刺激を触覚刺激と異なる位置に提示して触覚位置を制御する場合、視覚提示位置と触覚提示位置のずれに敏感になるため視覚刺激の影響力が弱まり、視覚刺激で制御可能な触覚提示範囲は狭まると考えられる。この仮定に基づくと、前腕は身体部位の中で空間分解能が低い部位であることから、ヒトの身体上で視覚刺激により触覚位置を制御できる範囲は最大でも半径 20 mm の範囲内だと推測される。この値は本研究の提案手法の触覚提示範囲拡大の限界距離を示している。

5.5.2 触覚提示部位について

手のひらに設置した触覚ディスプレイでは、前腕と同様に視覚刺激により触覚位置を制御できる可能性が示唆されたが、手のひらの形や機械受容器の分布は前腕と大きく異なるため、視覚刺激で触覚位置を制御するための条件はより複雑となってしまう。また、スマートフォンなどの把持型デバイスにおいて提案手法を用いる場合、振動モータの設置場所と皮膚が離れてしまう場合があり、触覚位置を制御することはより難しくなることがわかった。

提案手法の制約条件として、触覚提示位置を視覚で捉える必要がある。したがって、背中などの背面部分に振動モータを設置する場合は提案手法を利用することができない。また、触覚フィードバックは視覚障害者にも広く使われているが、提案手法を適用することができない。

5.5.3 同時に振動させるモータ数について

予備実験にて、手のひらや前腕で3個以上の振動モータを同時に振動させて触覚提示を行ったところ、体験者からは振動知覚位置が特定しにくいというコメントが得られた。したがって、ファントムセンセーションを活用して触覚の位置を情報伝達に利用する触覚ディスプレイの場合、同時に振動させるモータ数は2個以下が望ましいと言える。

5.5.4 触知覚位置の個人差について

すべてのデモ展示において、触覚の知覚に個人差が見られた。例えば、ファントムセンセーションによる触覚提示を行ったときに、はっきりと1点が振動していると感じる体験者と、ぼんやりと面全体が震えているように感じる体験者がいた。一方、第4章の実験1の結果が示すように視覚刺激によりファントムセンセーションの生起を制御させた場合は、ほとんどの被験者の触知覚位置を意図したとおりに制御することに成功している。したがって、視触覚刺激提示環境下においては、視覚刺激を併用することで触知覚位置の個人差を吸収することが可能であると考えられる。

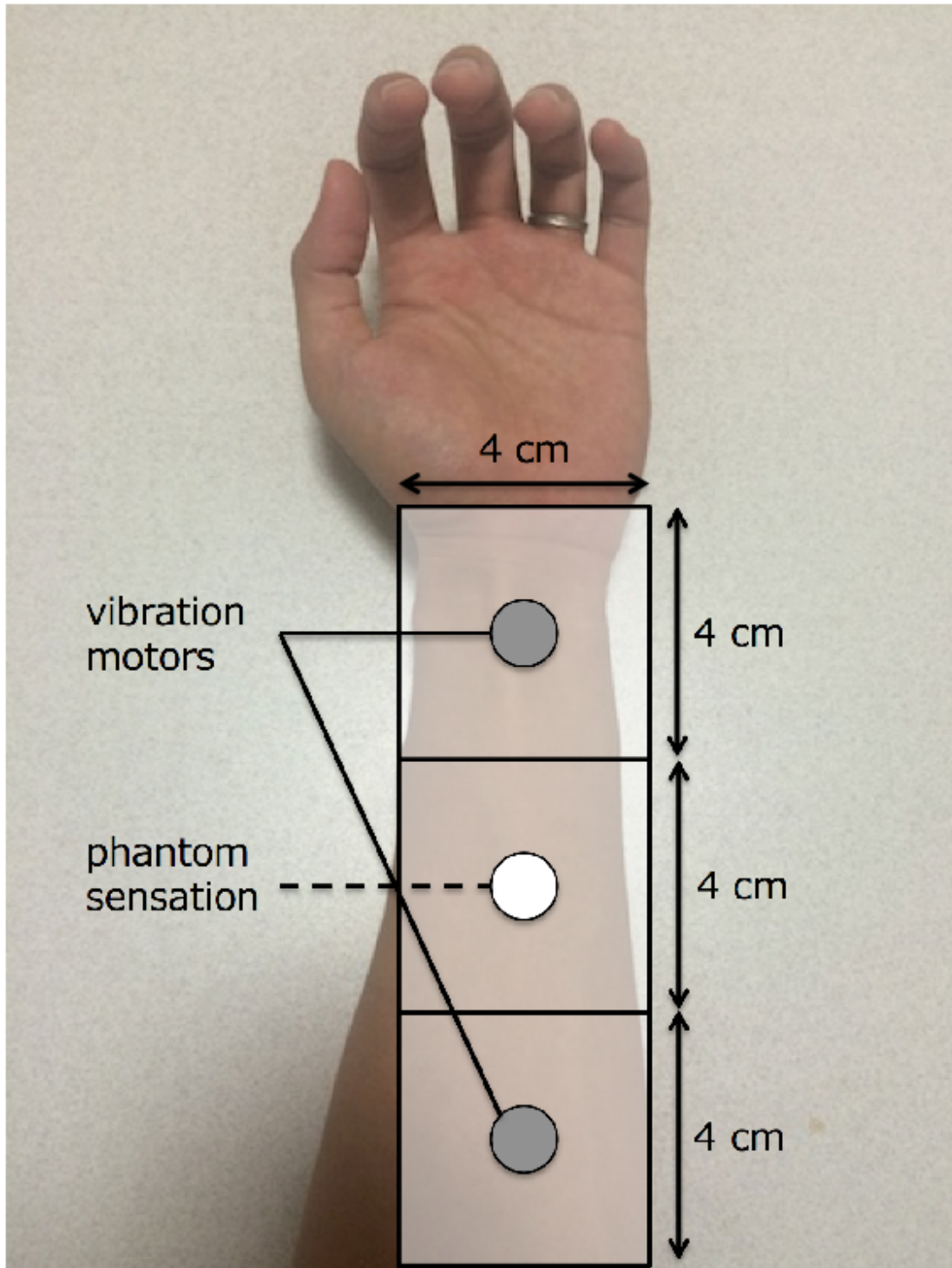


図 5.1 振動モータの設置位置の例



図 5.2 テーブルトップ型視触覚ディスプレイの例

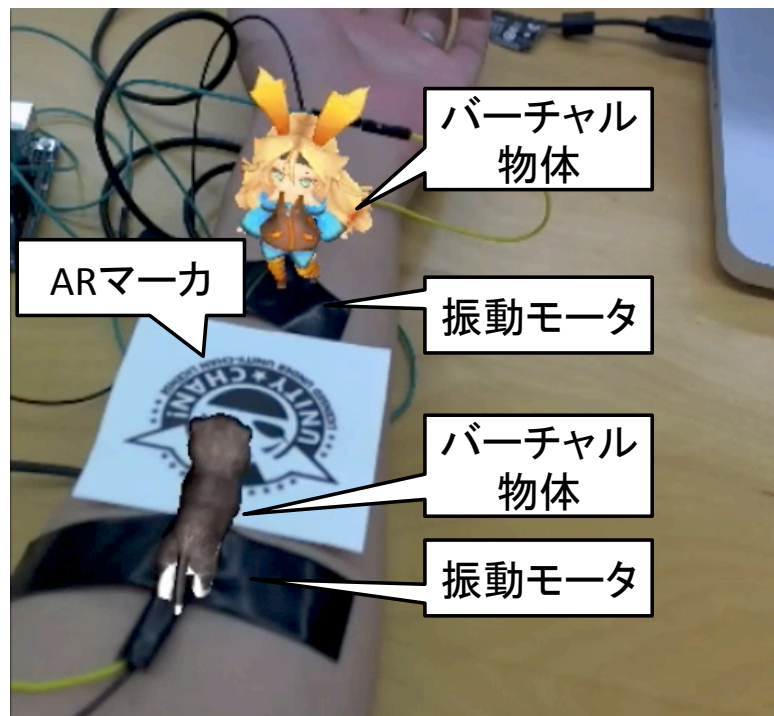


図 5.3 身体上を AR キャラクタが動く様子



図 5.4 手のひら用触覚ディスプレイ

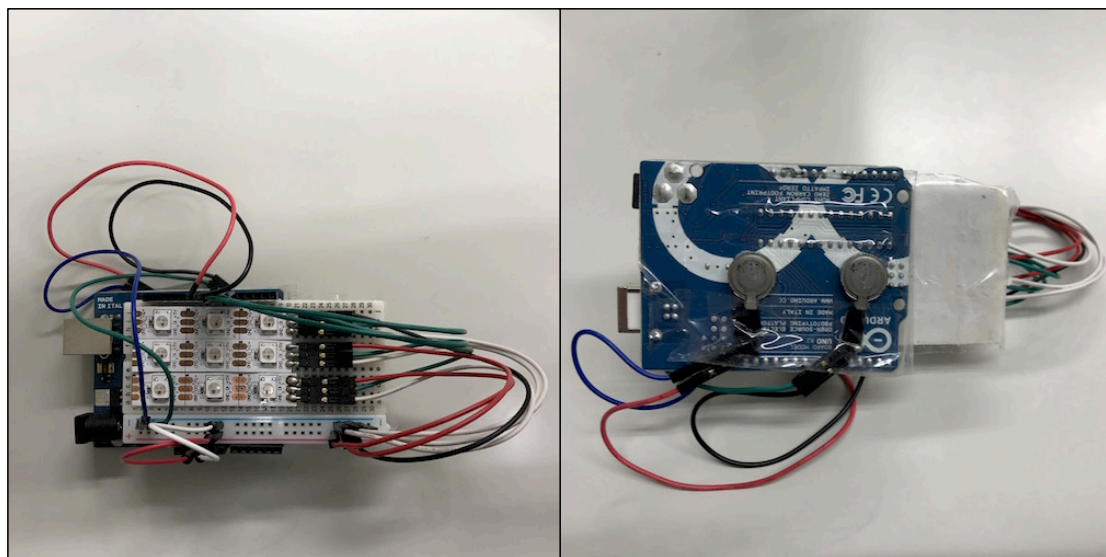


図 5.5 筐体設置型触覚ディスプレイ

第6章 結論

6.1 結論

本論文は、少数のアクチュエータで構成された触覚ディスプレイによる触覚フィードバック提示時のユーザの触覚パターンへの拡張を目的とし、視覚刺激と触覚刺激のクロスモダリティを利用することで、触覚位置の転移、触覚点数の増減、触錯覚生起の制御を可能とする手法について提案した。視覚刺激により触覚を誘導するための条件として、視覚刺激の提示位置と触覚刺激の提示位置の距離に着目し、様々な視触覚刺激提示条件下における触覚について検証実験を行った。従来研究では、触覚の位置だけでなく個数や錯覚まで含めて視覚刺激で制御した例はなく、視触覚刺激環境下における触覚表現拡張のための視覚刺激の有用性について示したことが貢献である。

第1章では、バーチャルリアリティの分野における触覚ディスプレイの現状と課題を紹介した。触覚ディスプレイの需要は高まっているが、まだ発展途上であり、現実の触覚を忠実に再現することが難しいことや、広範囲の触覚提示や多様な触覚情報を提示するためには多数のアクチュエータが必要になるという課題を述べた。本研究は、少数のアクチュエータによる触覚フィードバックにおいて、ユーザの空間的知覚を拡張することを目的とした視触覚刺激提示手法について検討した。検討項目は、社会的普及や提案手法の実現性に鑑みて以下のように設定した。

- 対象：触覚ディスプレイ
- アクチュエータ：振動モータ
- 部位：前腕
- 研究目的：少数のアクチュエータで複雑な触覚表現を可能とする

振動刺激の位置や個数や触錯覚の制御を含む複雑な触覚表現を実現するために、ヒトの空間的知覚において視覚が優位であることに着目し、視覚と触覚のクロスモダリティを利用した触覚制御手法を提案した。具体的には、触覚刺激と同時に提示する視覚刺激の提

示パターンを変化させることで、触知覚位置を転移させたり、触知覚点の個数を変化させたり、ファントムセンセーションの生起を制御したりする。触知覚が視覚に誘導される条件として、空間的整合性が保たれることが重要であり、空間的位置の知覚においては視覚刺激と触覚刺激の提示位置の距離が重要であると考え、この距離がある閾値以下の範囲内では、視覚刺激に誘導されて触知覚が変化すると仮定した。提案手法の実現性を検証するために、視触覚刺激提示環境下において、単数の視覚刺激が触知覚位置に与える影響と複数の視覚刺激が触知覚位置に与える影響について調査した。

第2章では、本研究に関連がある以下の分野に関する研究を紹介した。

- 触覚の生理学的知見
- 触錯覚
- ファントムセンセーション
- 視覚と触覚のクロスモダリティ
- 振動モータを用いた触覚ディスプレイ

関連研究をまとめるとともに、本研究の位置づけを明らかにした。従来研究では、触知覚位置に関する視覚刺激の影響について調査した研究があるが、触知覚位置だけでなく、触知覚点数や錯覚の生起の制御に視覚刺激を利用した例はない。本研究では、視覚刺激を利用することで、触知覚位置だけでなく、触知覚点数や錯覚の生起まで含めて制御する手法を提案し、その実現性を実験によって検証したことが本研究の新規性である。

第3章では、単数の視覚刺激提示が触知覚位置に与える影響について検証実験を実施した。実験の項目は以下のとおりである。

- 振動モータにより直接触覚提示した場合とファントムセンセーションを利用して触覚提示した場合における触知覚位置。
- 2個の振動モータの線分上で、触覚刺激のみを提示した場合と視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示した場合における触知覚位置。
- 2個の振動モータの線分上で、視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示した場合における触知覚位置。
- 2個の振動モータの線分上で、バーチャル物体の動きの軌跡を提示した場合の触知覚位置。

- 二次元平面上において、視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示した場合の触知覚位置.

実験結果より、振動モータの実刺激による触覚提示の場合でもファントムセンセーションによる触覚提示の場合でも、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が一定値以下ならば触知覚位置が視覚提示位置方向に転移することが示された。

第4章では、第3章で得られた知見を拡張するため、複数の視覚刺激提示が触知覚位置に与える影響について検証実験を実施した。触知覚位置だけでなく、触知覚点の個数や錯覚の生起確率にも着目し、以下の項目について検討した。

- 複数の視覚刺激がファントムセンセーションの生起に与える影響.
- 複数の視覚刺激提示が触知覚位置の定位に与える影響.

実験結果より、視覚刺激の提示個数が増えることで触知覚点の個数も変化することが示唆され、合わせてファントムセンセーションの生起も視覚刺激によって制御することが可能であると示された。

第5章では、第3章と第4章の実験結果を基に、視覚刺激と触覚刺激の提示位置の距離を考慮して、以下の触覚ディスプレイを実装した。

- 前腕に振動モータを設置した触覚ディスプレイ.
- 手のひらに振動モータを設置した触覚ディスプレイ.
- 小型の筐体に振動モータを設置した触覚ディスプレイ.

それぞれの触覚ディスプレイを用いてデモ展示を行い、体験者のフィードバックコメントを紹介した。前腕や手のひらに直接振動モータを設置した場合は、単純なアクチュエータ制御でも空間的整合性を保った違和感のない視触覚刺激を提示することができたが、筐体に振動モータを設置した場合は、振動点と皮膚が離れる可能性があり、意図した位置に触覚提示を行うことが難しかった。

6.2 今後の展望

本論文は、感覚間相互作用を用いた視触覚刺激提示手法に関する研究について述べた。本研究の貢献は、限られた条件下ではあるが、視覚刺激を利用して触知覚位置を制御する手

法の実現性を確認し、今後の触覚ディスプレイの研究開発における設計指針の一つを示したことである。

本論文の最後に、触覚ディスプレイの研究に関する今後の展望について、個人的な考えを述べる。バーチャルリアリティ技術が今後さらに普及していくためには、触覚技術の発展が欠かせないものとなるが、触覚ディスプレイは、視覚ディスプレイのように高解像度である必要はない。なぜなら、ヒトの触覚の空間分解能は視覚に比べて遥かに低いからである。一方で、振動刺激のようなプリミティブな触覚刺激でも、バーチャル物体の存在感を表現することは十分に可能であり、視覚刺激や聴覚刺激と組み合わせあせてコンテキストをもたせることで、単純な触覚フィードバックに対して様々な情報をのせることができ、新たなメディアとしての役割を担えると考えている。

また、触覚ディスプレイが発展途上であることは必ずしもマイナスだとは考えておらず、一般の人々にとって触覚ディスプレイは馴染みがないからこそ、新しい触覚ディスプレイを開発するたびに新鮮な驚きを持って体験してもらえるとと言える。バーチャルリアリティにおける触覚提示技術の研究は、新たな Human-Computer Interaction を実現し、人々に未知の体験を提供できる可能性が高い分野である。近年では、振動刺激だけでなく、電気刺激や超音波刺激を用いた触覚提示の研究も多数行われている。触覚は視覚や聴覚以上に現実の環境にインタラクションする（物体を動かすなど）ことができることから、徐々に触覚がヒトと環境とのインタフェースの中心的役割を担っていくと考えている。

謝辞

本論文は、著者が東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻 博士前期課程および博士後期課程在学中に行った研究をまとめたものです。指導教員の小川剛史准教授には、5年間を通じて研究の進め方について指導していただき心より感謝致します。

CNL研究室のみなさまには、研究活動だけでなく、日々の研究室生活で大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。

最後に、家族への最大限の感謝の意を表しつつ、本論文の結びと致します。

発表文献

論文誌

1. 新島 有信, 小川 剛史. “拡張現実感における視覚刺激位置が触知覚位置に与える影響の分析”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 17, No. 2, pp. 73-78 (June 2012).
2. 新島 有信, 小川 剛史. “視覚刺激を用いたファントムセンセーションの生起の制御に関する検討”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 1, pp. 93-100 (Mar. 2016).
3. 新島 有信, 小川 剛史. “視触覚融合コンテンツにおける複数の視覚刺激と振動刺激によるクロスモーダル知覚に関する検討”, 情報処理学会論文誌 (デジタルコンテンツ), Vol. 4, No. 2, pp. 19-26 (Aug. 2016).

国際会議

1. Arinobu Nijjima, Takefumi Ogawa. “Influence Analysis of Visual Stimuli on Localization of Tactile Stimuli in Augmented Reality”, Proc. of IEEE Virtual Reality Conference (VR2012), Orange County, CA, USA, Poster, pp. 105-106 (Mar. 2012).
2. Arinobu Nijjima, Takefumi Ogawa. “A Study of Changing Locations of Vibrotactile Perception on a Forearm by Visual Stimulation”, Proc. of the 7th International Conference on Collaboration Technologies (CollabTech 2014), Santiago, Chile, pp. 86-95, (Sept. 2014).
3. Arinobu Nijjima, Takefumi Ogawa. “Visual Stimulation Influences on the Position of Vibrotactile Perception”, Proc. of AsiaHaptics 2014, Tsukuba, Japan, pp. 29-36, (Nov. 2014).

4. Arinobu Nijima, Takefumi Ogawa. “A Study on Control of a Phantom Sensation by Visual Stimuli”, Proc. of EuroHaptics 2016, London, United Kingdom, pp. 305-315, (Jul. 2016).

国内会議 (査読あり)

1. 新島 有信, 小川 剛史. “拡張現実感における視覚刺激と触覚刺激の提示位置の距離が触覚位置に与える影響”, VR 学研報, Vol. 16, No. CS-4, CSV2011-54, pp. 11-14 (Dec. 2011).

国内会議 (査読なし)

1. 新島 有信, 小川 剛史. “拡張現実感における触覚刺激に対する視覚刺激の影響に関する一考察”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 110, No. 456, MVE2010-167, pp. 195-200 (Mar. 2011).
2. 新島 有信, 小川 剛史. “拡張現実感における仮想物体の動きが触覚に与える影響に関する一考察”, VR 学研報, Vol. 16, No. CS-1, CSV2011-7, pp. 37-42 (Apr. 2011).
3. 新島 有信, 小川 剛史. “拡張現実感における視覚刺激を利用した上肢への触覚提示手法に関する一考察”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 111, No. 479, MVE2011-117, pp. 127-132 (Mar. 2012).
4. 新島 有信, 小川 剛史. “視触覚提示インタフェースにおけるアクチュエータ削減が触覚に与える影響の評価”, VR 学研報, Vol. 17, No. CS-1, CSV2012-1, pp. 1-6 (Apr. 2012).
5. 新島 有信, 小川 剛史. “視覚刺激を用いたファントムセンセーションの生起の制御に関する一考察”, VR 学研報, Vol. 20, No. CS-1, CSV2015-1, pp. 1-6 (Mar. 2015).
6. 新島 有信, 小川 剛史. “視触覚融合コンテンツにおける視覚刺激と振動刺激のクロスモーダル知覚に関する一検討”, 情報処理学会研究報告, Vol. 2015-DCC-11, No. 12 (Nov. 2015).

受賞

1. サイバースペース研究賞: 新島 有信 , 小川 剛史. “拡張現実感における仮想物体の動きが触知覚に与える影響に関する一考察”, VR 学研報, Vol. 16, No. CS-1, CSVC2011-7, pp. 37-42 (Apr. 2011).
2. 優秀発表賞: 新島 有信 , 小川 剛史. “拡張現実感における視覚刺激と触覚刺激の提示位置の距離が触知覚位置に与える影響”, VR 学研報, Vol. 16, No. CS-4, CSVC2011-54, pp. 11-14 (Dec. 2011).
3. 優秀発表賞 (学内) : 新島 有信 . “拡張現実感における視覚刺激を利用した触覚提示手法の提案と評価”, 融合情報学コース輪講 ポスター発表 (Jul. 2011).
4. 優秀発表賞 (学内) : 新島 有信 . “視触覚融合コンテンツにおける視覚と触覚のクロスモーダル知覚に関する検討”, 融合情報学コース輪講 ポスター発表 (Jan. 2016).

その他の発表文献

1. 新島 有信 , 小川 剛史. “電氣的筋肉刺激を用いたバーチャル食感提示手法に関する検討”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 4, pp. 575-583 (Dec. 2016).
2. Arinobu Niijima, Takefumi Ogawa. “A Proposal of Virtual Food Texture by Electric Muscle Stimulation”, Proc. of 8th Workshop on Multimedia for Cooking and Eating Activities (CEA 2016, in conjunction with The 2016 IEEE International Conference on Multimedia and Expo), Seattle, USA, pp. 1-6, (Jul. 2016).
3. Arinobu Niijima, Takefumi Ogawa. “Virtual Food Texture by Electrical Muscle Stimulation”, Proc. of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC2016), Heidelberg, Germany, pp. 48-49, (Sep. 2016).
4. Arinobu Niijima, Takefumi Ogawa. “Study on Control Method of Virtual Food Texture by Electrical Muscle Stimulation”, Proc. of 29th ACM User Interface Software and Technology Symposium (UIST2016), Tokyo, Japan, pp. 199-200, (Oct. 2016).

5. 新島 有信 , 小川 剛史. “電気刺激を用いたバーチャル食感提示手法に関する一検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 115, No. 493, MVE2015-62, pp.49-54 (Mar. 2016).

その他の受賞

1. Best Paper Award: Arinobu Niijima, Takefumi Ogawa. “A Proposal of Virtual Food Texture by Electric Muscle Stimulation”, Proc. of 8th Workshop on Multimedia for Cooking and Eating Activities (CEA 2016, in conjunction with The 2016 IEEE International Conference on Multimedia and Expo), Seattle, USA, pp. 1-6, (Jul. 2016).
2. MVE 賞: 新島 有信 , 小川 剛史. “電気刺激を用いたバーチャル食感提示手法に関する一検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 115, No. 493, MVE2015-62, pp.49-54 (Mar. 2016).
3. HC 賞: 新島 有信 , 小川 剛史. “電気刺激を用いたバーチャル食感提示手法に関する一検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 115, No. 493, MVE2015-62, pp.49-54 (Mar. 2016).

参考文献

- [1] 日本バーチャルリアリティ学会（編）．バーチャルリアリティ学．コロナ社, 2010.
- [2] Frank Biocca, Jin Kim, and Yung Choi. Visual touch in virtual environments: An exploratory study of presence, multimodal interfaces, and cross-modal sensory illusions. *Presence*, Vol. 10, No. 3, pp. 247–265, 2001.
- [3] Kouta Minamizawa, Souichiro Fukamachi, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Gravity grabber: wearable haptic display to present virtual mass sensation. In *ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies*, p. 8. ACM, 2007.
- [4] Ping Lee, David Cheok, Soon James, Lyn Debra, Wen Jie, Wang Chuang, and Farzam Farbiz. A mobile pet wearable computer and mixed reality system for human–poultry interaction through the internet. *Personal and Ubiquitous Computing*, Vol. 10, No. 5, pp. 301–317, 2006.
- [5] Takafumi Aoki, Hironori Mitake, Danial Keoki, Shoichi Hasegawa, and Makoto Sato. Wearable haptic device to present contact sensation based on cutaneous sensation using thin wire. In *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, pp. 115–122. ACM, 2009.
- [6] Hideyuki Sawada, Chang’an Jiang, and Hiroshi Takase. Tactoglove: Displaying tactile sensations in tacto-gestural interaction. In *Biometrics and Kansei Engineering (ICBAKE), 2011 International Conference on*, pp. 216–221. IEEE, 2011.
- [7] Yukari Konishi, Nobuhisa Hanamitsu, Kouta Minamizawa, Ayahiko Sato, and Tetsuya Mizuguchi. Synesthesia suit: the full body immersive experience. In *ACM SIGGRAPH 2016 VR Village*, p. 20. ACM, 2016.

- [8] Ali Israr and Ivan Poupyrev. Tactile brush: drawing on skin with a tactile grid display. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2019–2028. ACM, 2011.
- [9] Hiroyuki Kajimoto. Electrotactile display with real-time impedance feedback using pulse width modulation. *Haptics, IEEE Transactions on*, Vol. 5, No. 2, pp. 184–188, 2012.
- [10] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, and Hiroyuki Shinoda. Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound. *Haptics, IEEE Transactions on*, Vol. 3, No. 3, pp. 155–165, 2010.
- [11] Thomas H Massie and J Kenneth Salisbury. The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects. In *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, pp. 295–300. Chicago, IL, 1994.
- [12] Makoto Sato. Development of string-based force display: Spidar. In *8th International Conference on Virtual Systems and Multimedia*. Citeseer, 2002.
- [13] Max Pfeiffer, Stefan Schneegass, Florian Alt, and Michael Rohs. Let me grab this: A comparison of ems and vibration for haptic feedback in free-hand interaction. In *Proceedings of the 5th Augmented Human International Conference*, pp. 48:1–48:8. ACM, 2014.
- [14] Pedro Lopes, Alexandra Ion, and Patrick Baudisch. Impacto: Simulating physical impact by combining tactile stimulation with electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, pp. 11–19. ACM, 2015.
- [15] Arinobu Nijima and Takefumi Ogawa. Study on control method of virtual food texture by electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 199–200. ACM, 2016.
- [16] Masaaki Fukumoto and Toshiaki Sugimura. Active click: tactile feedback for touch panels. In *CHI'01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 121–122. ACM, 2001.

- [17] Jukka Linjama and Topi Kaaresoja. Novel, minimalist haptic gesture interaction for mobile devices. In *Proceedings of the third Nordic conference on Human-computer interaction*, pp. 457–458. ACM, 2004.
- [18] Giuseppe Ghiani, Barbara Leporini, and Fabio Paternò. Vibrotactile feedback as an orientation aid for blind users of mobile guides. In *Proceedings of the 10th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services*, pp. 431–434. ACM, 2008.
- [19] Koji Yatani, Nikola Banovic, and Khai Truong. Spacesense: representing geographical information to visually impaired people using spatial tactile feedback. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 415–424. ACM, 2012.
- [20] Erin Piatieski and Lynette Jones. Vibrotactile pattern recognition on the arm and torso. In *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics Conference*, pp. 90–95. IEEE, 2005.
- [21] Yosuke Mizukami and Hideyuki Sawada. Tactile information transmission by apparent movement phenomenon using shape-memory alloy device. *International Journal on Disability and Human Development*, Vol. 5, No. 3, pp. 277–284, 2006.
- [22] Christoph W Borst and Vijay B Baiyya. Enhancing vr-based visualization with a 2d vibrotactile array. In *Proceedings of the 2007 ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pp. 183–186. ACM, 2007.
- [23] Ronald T Azuma. A survey of augmented reality. *Presence*, Vol. 6, No. 4, pp. 355–385, 1997.
- [24] Ali Israr and Ivan Poupyrev. Control space of apparent haptic motion. In *World Haptics Conference (WHC), 2011 IEEE*, pp. 457–462. IEEE, 2011.
- [25] James C Craig. Visual motion interferes with tactile motion perception. *PERCEPTION-LONDON-*, Vol. 35, No. 3, p. 351, 2006.

- [26] Marc O Ernst and Martin S Banks. Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, Vol. 415, No. 6870, pp. 429–433, 2002.
- [27] Salvador Salvador Soto-Faraco, Charles Spence, and Alan Kingstone. Congruency effects between auditory and tactile motion: extending the phenomenon of cross-modal dynamic capture. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, Vol. 4, No. 2, pp. 208–217, 2004.
- [28] 鍵本麻美, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行. 複合現実型視覚刺激と聴覚刺激が触印象に与える影響-産業応用システムでの利用を想定した評価. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 14, No. 3, pp. 325–333, 2009.
- [29] Naoya Koizumi, Hidekazu Tanaka, Yuji Uema, and Masahiko Inami. Chewing jockey: augmented food texture by using sound based on the cross-modal effect. In *Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, p. 21. ACM, 2011.
- [30] Hiroshi Endo, Shuichi Ino, and Waka Fujisaki. Improving the palatability of nursing care food using a pseudo-chewing sound generated by an emg signal. In *International Conference on Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management*, pp. 212–220. Springer, 2016.
- [31] Yuichi Hirano, Asako Kimura, Fumihisa Shibata, and Hideyuki Tamura. Psychophysical influence of mixed-reality visual stimulation on sense of hardness. In *Virtual Reality Conference (VR), 2011 IEEE*, pp. 51–54. IEEE, 2011.
- [32] 片岡佑太, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子. 複合現実型視覚提示が痛覚刺激の知覚に及ぼす影響. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 2, pp. 275–283, 2014.
- [33] Lara Rahal, Jongeun Cha, Abdulmotaleb El Saddik, Julius Kammerl, and Eckehard Steinbach. Investigating the influence of temporal intensity changes on apparent movement phenomenon. In *Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurements Systems, 2009. VECIMS'09. IEEE International Conference on*, pp. 310–313. IEEE, 2009.
- [34] Ahmad Barghout, Jongeun Cha, Abdulmotaleb El Saddik, Julius Kammerl, and Eckehard Steinbach. Spatial resolution of vibrotactile perception on the human

- forearm when exploiting funneling illusion. In *Haptic Audio visual Environments and Games, 2009. HAVE 2009. IEEE International Workshop on*, pp. 19–23. IEEE, 2009.
- [35] 下条誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人 (編) . 触覚認識メカニズムと応用技術. S&T 出版, 2014.
- [36] Kenneth Johnson. Neural basis of haptic perception. *Stevens' handbook of experimental psychology*, 2002.
- [37] Roland S Johansson and Åke B Vallbo. Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. *Trends in neurosciences*, Vol. 6, pp. 27–32, 1983.
- [38] A Gescheider, Stanley J Bolanowski, and Kathleen R Hardick. The frequency selectivity of information-processing channels in the tactile sensory system. *Somatosensory & Motor Research*, Vol. 18, No. 3, pp. 191–201, 2001.
- [39] Susan J Lederman. Skin and touch. *Encyclopedia of human biology*, Vol. 7, pp. 51–63, 1991.
- [40] Joseph C Stevens and Kenneth K Choo. Spatial acuity of the body surface over the life span. *Somatosensory & motor research*, Vol. 13, No. 2, pp. 153–166, 1996.
- [41] Vincent Hayward. A brief taxonomy of tactile illusions and demonstrations that can be done in a hardware store. *Brain research bulletin*, Vol. 75, No. 6, pp. 742–752, 2008.
- [42] Susan J Lederman and Lynette A Jones. Tactile and haptic illusions. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 4, No. 4, pp. 273–294, 2011.
- [43] Susan J Lederman. “improving one ’ s touch ” … and more. *Perception & psychophysics*, Vol. 24, No. 2, pp. 154–160, 1978.
- [44] Gianni Campion. On the synthesis of haptic textures. In *the synthesis of three dimensional haptic textures: geometry, control, and psychophysics*, pp. 73–97. Springer, 2008.

- [45] Anatole Lécuyer. Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 18, No. 1, pp. 39–53, 2009.
- [46] Mandayam A Srinivasan, Gerald Lee Beauregard, and David L Brock. The impact of visual information on the haptic perception of stiffness in virtual environments. In *ASME Winter Annual Meeting*, Vol. 58, pp. 555–559, 1996.
- [47] AD Craig and MC Bushnell. The thermal grill illusion: unmasking the burn of cold pain. *Science*, Vol. 265, No. 5169, pp. 252–255, 1994.
- [48] Albert Y Leung, Mark S Wallace, Gery Schulteis, and Tony L Yaksh. Qualitative and quantitative characterization of the thermal grill. *Pain*, Vol. 116, No. 1, pp. 26–32, 2005.
- [49] J Randall Flanagan and Michael A Beltzner. Independence of perceptual and sensorimotor predictions in the size–weight illusion. *Nature neuroscience*, Vol. 3, No. 7, pp. 737–741, 2000.
- [50] Satoru Kawai, Frank Henigman, Christine L MacKenzie, Alex B Kuang, and Paul H Faust. A reexamination of the size–weight illusion induced by visual size cues. *Experimental brain research*, Vol. 179, No. 3, pp. 443–456, 2007.
- [51] Kotaro Suzuki and Ryoko Arashida. Geometrical haptic illusions revisited: Haptic illusions compared with visual illusions. *Perception & Psychophysics*, Vol. 52, No. 3, pp. 329–335, 1992.
- [52] Edouard Gentaz and Yvette Hatwell. Geometrical haptic illusions: The role of exploration in the müller-lyer, vertical-horizontal, and delboeuf illusions. *Psychonomic Bulletin & Review*, Vol. 11, No. 1, pp. 31–40, 2004.
- [53] Robert H Cormack. Haptic illusion: Apparent elongation of a disk rotated between the fingers. *Science*, Vol. 179, No. 4073, pp. 590–592, 1973.
- [54] Karen N Jones, R Mark Touchstone, and Charles F Gettys. A tactile illusion: The rotating hourglass. *Perception & Psychophysics*, Vol. 15, No. 2, pp. 335–338, 1974.

- [55] Daniel Goldreich. A bayesian perceptual model replicates the cutaneous rabbit and other tactile spatiotemporal illusions. *PloS one*, Vol. 2, No. 3, p. e333, 2007.
- [56] David Alles. Information transmission by phantom sensations. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, Vol. 1, No. 11, pp. 85–91, 1970.
- [57] Frank A Geldard and Carl E Sherrick. The cutaneous “rabbit”: A perceptual illusion. *Science*, Vol. 178, No. 4057, pp. 178–179, 1972.
- [58] Carl E Sherrick and Ronald Rogers. Apparent haptic movement. *Perception & Psychophysics*, Vol. 1, No. 3, pp. 175–180, 1966.
- [59] 大山正, 今井省吾, 和気典二 (編) . 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック. 誠信書房, 1994.
- [60] Eve Hoggan, Sohail Anwar, and Stephen A Brewster. Mobile multi-actuator tactile displays. In *International Workshop on Haptic and Audio Interaction Design*, pp. 22–33. Springer, 2007.
- [61] Hendrik Richter, Benedikt Blaha, Alexander Wiethoff, Dominikus Baur, and Andreas Butz. Tactile feedback without a big fuss: simple actuators for high-resolution phantom sensations. In *Proceedings of the 13th international conference on Ubiquitous computing*, pp. 85–88. ACM, 2011.
- [62] Makoto Miyazaki, Masaya Hirashima, and Daichi Nozaki. The “cutaneous rabbit” hopping out of the body. *The Journal of Neuroscience*, Vol. 30, No. 5, pp. 1856–1860, 2010.
- [63] Jaedong Lee, Youngsun Kim, and Gerard Kim. Funneling and saltation effects for tactile interaction with virtual objects. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 3141–3148. ACM, 2012.
- [64] Jongman Seo and Seungmoon Choi. Initial study for creating linearly moving vibrotactile sensation on mobile device. In *Haptics Symposium, 2010 IEEE*, pp. 67–70. IEEE, 2010.

- [65] Byung-Kuk Seo, Junyeoung Choi, Jae-Hyek Han, Hanhoon Park, and Jong-Il Park. One-handed interaction with augmented virtual objects on mobile devices. In *Proceedings of The 7th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*, pp. 8:1–8:6. ACM, 2008.
- [66] Shintaro Ueda, Masafumi Uchida, Akio Nozawa, and Hideto Ide. A tactile display using phantom sensation with apparent movement together. *Electronics and Communications in Japan*, Vol. 91, No. 12, pp. 29–38, 2008.
- [67] Youngsun Kim, Jaedong Lee, and Gerard Kim. Extending out of the body saltation to 2d mobile tactile interaction. In *Proceedings of the 10th asia pacific conference on Computer human interaction*, pp. 67–74. ACM, 2012.
- [68] Anatole Lecuyer, Sabine Coquillart, Abderrahmane Kheddar, Paul Richard, and Philippe Coiffet. Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback? In *Virtual Reality, 2000. Proceedings. IEEE*, pp. 83–90. IEEE, 2000.
- [69] Matthew Botvinick, Jonathan Cohen, et al. Rubber hands’ feel’touch that eyes see. *Nature*, Vol. 391, No. 6669, pp. 756–756, 1998.
- [70] 北崎充晃. 位置恒常性における視覚・運動順応の普遍性: 視覚情報量, 両眼間転移, 能動的・受動的運動. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 18, No. 2, pp. 109–115, 2013.
- [71] 雨宮智浩, 広田光一, 池井寧. 座面上の触仮現運動が及ぼす視覚誘導性自己運動感覚の速度知覚変化. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 18, No. 2, pp. 121–130, 2013.
- [72] 佐々木博, 藤田欣也. 力覚提示装置を用いた硬さ提示における視覚情報の寄与と改変効果に関する実験的検討. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 5, No. 1, pp. 795–802, 2000.
- [73] 佐野洋平, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子. 動的に変化する複合現実型視覚刺激が重さ知覚に与える影響. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 2, pp. 255–264, 2014.

- [74] 面迫宏樹, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行. Shape-cog illusion: 複合現実感体験時の視覚刺激による重心知覚の錯覚現象 (第 2 報). *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 18, No. 2, pp. 117–120, 2013.
- [75] Taku Hachisu, Gabriel Cirio, Maud Marchal, Anatole Lécuyer, and Hiroyuki Kajimoto. Pseudo-haptic feedback augmented with visual and tactile vibrations. In *VR Innovation (ISVRI), 2011 IEEE International Symposium on*, pp. 327–328. IEEE, 2011.
- [76] Yuki Ban, Takashi Kajinami, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Modifying an identified angle of edged shapes using pseudo-haptic effects. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 25–36. Springer, 2012.
- [77] Jaedong Lee, Youngsun Kim, and Gerard Jounghyun Kim. Effects of visual feedback on out-of-body illusory tactile sensation when interacting with augmented virtual objects. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, pp. 1–12, 2016.
- [78] 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子. 複合現実型視覚刺激が温冷覚の知覚位置・知覚幅に与える影響. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 21, No. 3, pp. 503–511, 2016.
- [79] DAVID V FORREST. Phantoms in the brain: probing the mysteries of the human mind. *American Journal of Psychiatry*, 2000.
- [80] Manos Tsakiris and Patrick Haggard. The rubber hand illusion revisited: visuotactile integration and self-attribution. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 31, No. 1, p. 80, 2005.
- [81] Nicholas P Holmes, Gemma Crozier, and Charles Spence. When mirrors lie: “visual capture” of arm position impairs reaching performance. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, Vol. 4, No. 2, pp. 193–200, 2004.
- [82] Li M Chen, Robert M Friedman, and Anna W Roe. Optical imaging of a tactile illusion in area 3b of the primary somatosensory cortex. *Science*, Vol. 302, No. 5646, pp. 881–885, 2003.

- [83] Li M Chen, Gregory H Turner, Robert M Friedman, Na Zhang, John C Gore, Anna W Roe, and Malcolm J Avison. High-resolution maps of real and illusory tactile activation in primary somatosensory cortex in individual monkeys with functional magnetic resonance imaging and optical imaging. *The Journal of Neuroscience*, Vol. 27, No. 34, pp. 9181–9191, 2007.
- [84] Alberto Gallace and Charles Spence. The cognitive and neural correlates of “tactile consciousness”: A multisensory perspective. *Consciousness and cognition*, Vol. 17, No. 1, pp. 370–407, 2008.
- [85] Michael P Kilgard and Michael M Merzenich. Anticipated stimuli across skin. *Nature*, Vol. 3, p. 663, 1995.
- [86] Zhenzhu Yue, Gérard-Nisal Bischof, Xiaolin Zhou, Charles Spence, and Brigitte Röder. Spatial attention affects the processing of tactile and visual stimuli presented at the tip of a tool: an event-related potential study. *Experimental brain research*, Vol. 193, No. 1, pp. 119–128, 2009.
- [87] Martin Eimer and Jon Driver. An event-related brain potential study of cross-modal links in spatial attention between vision and touch. *Psychophysiology*, Vol. 37, No. 05, pp. 697–705, 2000.
- [88] Ivan Poupyrev, Shigeaki Maruyama, and Jun Rekimoto. Ambient touch: designing tactile interfaces for handheld devices. In *Proceedings of the 15th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 51–60. ACM, 2002.
- [89] Malcolm Hall, Eve Hoggan, and Stephen Brewster. T-bars: towards tactile user interfaces for mobile touchscreens. In *Proceedings of the 10th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services*, pp. 411–414. ACM, 2008.
- [90] Kouta Minamizawa, Yasuaki Kakehi, Masashi Nakatani, Soichiro Mihara, and Susumu Tachi. Tectile toolkit: a prototyping tool for design and education of haptic media. In *Proceedings of the 2012 Virtual Reality International Conference*, p. 26. ACM, 2012.

- [91] Koji Yatani and Khai Nhut Truong. Semfeel: a user interface with semantic tactile feedback for mobile touch-screen devices. In *Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 111–120. ACM, 2009.
- [92] Koji Yatani, Darren Gergle, and Khai Truong. Investigating effects of visual and tactile feedback on spatial coordination in collaborative handheld systems. In *Proceedings of the ACM 2012 conference on Computer Supported Cooperative Work*, pp. 661–670. ACM, 2012.
- [93] Sungjae Hwang, John Song, and Junghyeon Gim. Harmonious haptics: Enhanced tactile feedback using a mobile and a wearable device. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 295–298. ACM, 2015.
- [94] Youngsun Kim, Jaedong Lee, and Gerard J Kim. Designing of 2d illusory tactile feedback for hand-held tablets. In *Human-Computer Interaction*, pp. 10–17. Springer, 2015.
- [95] Ali Israr, Siyan Zhao, Kyna McIntosh, JaeKyun Kang, Zachary Schwemler, Eric Brockmeyer, Mark Baskinger, and Moshe Mahler. Po2: augmented haptics for interactive gameplay. In *ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies*, p. 21. ACM, 2015.
- [96] Moon-Sub Jin and Jong-Il Park. Interactive mobile augmented reality system using a vibro-tactile pad. In *VR Innovation (ISVRI), 2011 IEEE International Symposium on*, pp. 329–330. IEEE, 2011.
- [97] Alireza Sahami, Paul Holleis, Albrecht Schmidt, and Jonna Häkkinä. Rich tactile output on mobile devices. In *European Conference on Ambient Intelligence*, pp. 210–221. Springer, 2008.
- [98] Lorna M Brown, Stephen A Brewster, and Helen C Purchase. Multidimensional tactons for non-visual information presentation in mobile devices. In *Proceedings of the 8th conference on Human-computer interaction with mobile devices and services*, pp. 231–238. ACM, 2006.

- [99] 森尚平, 杉本一平, 永仮貴浩, 村田龍吾, 山元明彦, 田村秀行. Mass of roaches!-振動と視覚的演出の同期による mr アトラクションの演出. 第 15 回日本 VR 学会大会論文集, pp. 398–401, 2010.
- [100] 高瀬裕史, 姜長安, 澤田秀之. 拡張現実空間における触感覚呈示による仮想キャラクターとのインタラクションシステム. 情報処理学会 インタラクション, pp. 83–90, 2011.
- [101] 福山恵士, 澤田秀之. 視触覚の同時刺激によるテクスチャ感覚呈示システムの構築とその評価. 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 4, pp. 1562–1570, 2011.
- [102] Hirokazu Kato and Mark Billinghurst. Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In *Augmented Reality, 1999. (IWAR'99) Proceedings. 2nd IEEE and ACM International Workshop on*, pp. 85–94. IEEE, 1999.
- [103] Susan J Lederman and Roberta L Klatzky. Haptic perception: A tutorial. *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol. 71, No. 7, pp. 1439–1459, 2009.
- [104] 新島有信, 小川剛史. 拡張現実感における視覚刺激位置が触知覚位置に与える影響の分析. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 17, No. 2, pp. 73–78, 2012.
- [105] Arinobu Nijjima and Takefumi Ogawa. A study of changing locations of vibrotactile perception on a forearm by visual stimulation. In *Collaboration Technologies and Social Computing*, pp. 86–95. Springer, 2014.
- [106] Arinobu Nijjima and Takefumi Ogawa. Visual stimulation influences on the position of vibrotactile perception. In *Haptic Interaction*, pp. 29–36. Springer, 2015.